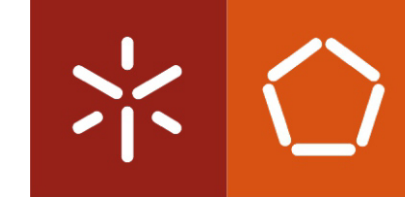


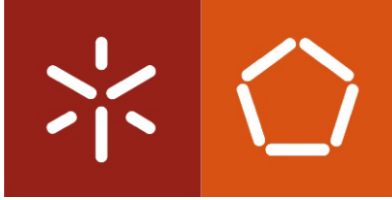


**Estudo e melhoramento de técnica de
aparafusamento de um autorrádio**

João Pedro Feixa Rodrigues

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Feixa Rodrigues

**Estudo e melhoramento de técnica de
aparafusamento de um autorrádio**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Mecânica

Trabalho Efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Nuno Peixinho

DECLARAÇÃO

Nome: João Pedro Feixa Rodrigues

Endereço eletrónico: a62093@alunos.uminho.pt

Telefone: +351 917556814

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14130984

Título da dissertação: Estudo e melhoramento de técnica de aparafusamento de um autorrádio

Orientadores:

Professor Doutor Nuno Peixinho

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia de Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura

Agradecimentos

Ao concluir este trabalho, torna-se imperioso manifestar o meu sincero agradecimento a todos os que, direta ou indiretamente, me ajudaram a torná-lo viável.

Ao Professor Doutor Nuno Peixinho, enquanto meu coordenador, que me acompanhou, ajudou e supervisionou esta dissertação.

Ao Eng.º Hugo Santos, Eng.º André Seara e Rui Gomes que me ajudaram na integração dentro da empresa e que sempre se mostraram disponíveis na discussão de questões relativas ao dispositivo de perpendicularidade.

Ao Professor Fernando Veloso, Professor Sandro Queirós e Professor António Moreira que me ajudaram a desenvolver conhecimentos nas áreas da informática e eletrónica e sem os quais não seria possível obter a execução deste projeto.

Num plano mais íntimo e pessoal, aos meus pais e irmão, que sempre desejaram o melhor para mim e sempre me inculcaram o sentido de responsabilidade e de motivação.

Por último, a todos os meus amigos, com quem partilhei as minhas alegrias e especialmente as minhas tristezas.

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida em ambiente empresarial, nomeadamente, no grupo de aparafusamento da empresa *Delphi*. A empresa produz principalmente autorrádios, cerca de 6 mil por dia, ou seja, 4 por minuto, pelo que muitos são os obstáculos que advêm desta elevada cadência de produção. Tendo isto em conta, este estágio focou-se em solucionar um, particularmente, no que respeita ao processo manual de aparafusamento do chassi do autorrádio.

Para que um bom processo de aparafusamento ocorra é necessário haver a perpendicularidade entre a máquina de aparafusar e a peça que está a ser trabalhada. No entanto, isso nem sempre é garantido, resultando em produtos defeituosos e consequentemente elevados custos para a empresa.

O objetivo deste projeto foi criar um dispositivo prático, de pequeno porte e que fosse capaz de medir precisamente o desfasamento angular entre máquina de aparafusar e mesa de aparafusamento. Com isso, seria possível ter informação relativa à orientação dos equipamentos e em caso de erro seria mais simples resolver tal situação.

Para testar o protótipo foram desenvolvidos dois tipos de testes, uns para obter a validação do próprio produto e outros para averiguar a fiabilidade dos equipamentos usados na empresa.

Concluindo, obtiveram-se resultados bastante positivos, o dispositivo concebido permite medições precisas e de forma rápida em todos os postos de trabalho, tal como pretendido. Deste modo, contribuiu-se para um processo produtivo de maior qualidade e assim foi do interesse da empresa colocar o dispositivo na linha de produção como um novo produto de manutenção.

Palavras-chave: Perpendicularidade, prototipagem, melhoria da qualidade de produção, parafusos.

Abstract

The present dissertation was developed on an industrial environment, particularly on the tightening section of Delphi. The company produces mostly auto radios, about 6 thousand per day, or 4 per minute, therefore there are a lot of obstacles to overcome during such an intensive production level. Because of so many problems, this internship was focused on solving one, regarding the manual tightening process of the auto radio 's "chassis".

To have a good tightening process it's always necessary to guarantee the perpendicularity between the screwdriver and the working piece. However, this fact isn't always achieved which results in defective products and consequently high costs for the company.

The main goal of this project was centred in building a small and practical device which would be able to obtain precise measurements of the angular mismatch between the screwdriver and the working piece. With that, it would be possible to get valuable information about the equipment 's orientation and in case of mistake it would be a lot easier to solve it.

To evaluate the prototype it was developed two types of tests, ones to validate the device itself and the others to check the reliability of the equipment's used on the production line of the company.

To conclude, the obtained results were very positive, the device allowed precise and fast measurements in all work stations and because of that it was of the interest of the company to introduce this as a new maintenance 's device.

Key words: Perpendicularity, prototyping, development of the production quality, screws

Índice

| | |
|---|-----------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | v |
| Abstract | vii |
| Índice | ix |
| Lista de figuras..... | xii |
| Lista de tabelas | xvii |
| Abreviaturas e Símbolos..... | xix |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Apresentação da empresa | 3 |
| 1.3 Estrutura da tese | 4 |
| Capítulo 2 Componentes de aparafusamento | 5 |
| 2.1 Máquinas de aparafusar | 5 |
| 2.2 <i>Bits</i> de aparafusamento..... | 9 |
| 2.3 <i>Ergo-arms</i> | 10 |
| 2.4 Parafusos | 11 |
| 2.4.1 Classificação quanto à função | 14 |
| 2.4.1.1 Parafusos passantes | 15 |
| 2.4.1.2 Parafusos não passantes | 15 |
| 2.4.2 Classificação quanto ao tipo..... | 15 |
| 2.4.2.1 <i>Machine screws</i> | 16 |
| 2.4.2.2 Parafusos autorroscantes | 19 |
| 2.5 “Dispositivos” e bases de aparafusamento..... | 22 |
| 2.6 Bancadas de aparafusamento..... | 24 |
| 2.7 Peças..... | 25 |
| Capítulo 3 Considerações teóricas de aparafusamento..... | 29 |
| 3.1 Objetivo de aparafusamento | 29 |
| 3.2 Fases de aparafusamento..... | 33 |
| 3.3 Encaixe entre parafuso e furo | 34 |
| 3.4 Tamanho do Parafuso | 36 |
| 3.5 Tamanho do Furo..... | 37 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.6 | Tipos de juntas, <i>Hard Joint</i> e <i>Soft Joint</i> | 39 |
| 3.6.1 | <i>Hard Joint</i> | 40 |
| 3.6.2 | <i>Soft joint</i> | 40 |
| 3.6.3 | Comparação visual | 42 |
| 3.6.4 | Relaxamento da junta | 42 |
| 3.6.4.1 | Soluções para o relaxamento da junta | 43 |
| 3.7 | Estudo das variáveis de aparafusamento..... | 44 |
| 3.7.1 | Binário dinâmico e binário estático..... | 44 |
| 3.7.2 | Estudo de binário..... | 45 |
| 3.7.3 | Monitorização de binário | 49 |
| 3.7.3.1 | 1º Caso..... | 50 |
| 3.7.3.2 | 2º Caso..... | 51 |
| 3.7.3.3 | 3º Caso..... | 51 |
| 3.7.4 | Monitorização angular | 52 |
| 3.8 | Validação de binário | 55 |
| Capítulo 4 Enquadramento ao Projeto e definição da solução | | 57 |
| 4.1 | Obstáculos de aparafusamento..... | 57 |
| 4.2 | Definição do problema..... | 61 |
| 4.3 | Requisitos para a solução | 62 |
| 4.4 | Definição da solução..... | 63 |
| Capítulo 5 Desenvolvimento e validação da solução protótipo | | 65 |
| 5.1 | Elaboração do protótipo | 65 |
| 5.1.1 | Sistema eletrónico | 67 |
| 5.1.1.1 | <i>Arduino</i> | 68 |
| 5.1.1.2 | <i>IMU</i> | 69 |
| 5.1.1.3 | Botão..... | 69 |
| 5.1.1.4 | LCD | 70 |
| 5.1.1.5 | <i>Buzzer</i> | 70 |
| 5.1.1.6 | Conjunto eletrónico | 71 |
| 5.1.2 | Sistema informático | 74 |
| 5.1.3 | Sistema mecânico | 79 |
| 5.1.3.1 | “Braçadeira” | 79 |
| 5.1.3.2 | Caixa e tampa..... | 82 |
| 5.1.4 | Protótipo1..... | 88 |
| 5.1.5 | Protótipo 2..... | 100 |
| 5.2 | Testes | 109 |
| 5.2.1 | Validação do dispositivo | 110 |
| 5.2.2 | Teste aos equipamentos | 115 |
| 5.3 | Implementação do dispositivo | 118 |
| Capítulo 6 Conclusões | | 119 |
| 6.1 | Limitações e desenvolvimentos futuros | 120 |
| Bibliografia..... | | 123 |
| Anexos | | 129 |
| Anexo 1 - Desenho técnico “braçadeira”..... | | 129 |

| | |
|--|-----|
| Anexo 2 - Desenho técnico placa PCB | 131 |
| Anexo 3 - Desenho técnico caixa | 133 |
| Anexo 4 - Desenho técnico tampa 1 | 135 |
| Anexo 5 - Desenho técnico tampa 2 | 137 |
| Anexo 6 - Desenho técnico protótipo 1 | 139 |
| Anexo 7 - Desenho técnico protótipo 2 | 141 |
| Anexo 8 - Exemplo de comunicação entre <i>Arduino</i> e <i>IMU</i> | 143 |
| Anexo 9 - Código do dispositivo de perpendicularidade | 151 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Máquina de aparafusar e mesa de aparafusamento | 2 |
| Figura 2.1 Máquina de aparafusar <i>Atlas Copco - Microtorque ETD M 80 ABL</i> (Flexible Assembly, 2015) | 6 |
| Figura 2.2 Máquina de aparafusar <i>Desoutter – ERS</i> (Assembly Mag, s.d.) | 7 |
| Figura 2.3 Máquina de aparafusar <i>Desoutter</i> e controlador <i>CVIC II</i> (Desoutter - Industrial Tools, 2009) | 8 |
| Figura 2.4 <i>Bits</i> de aparafusamento (Ebay UK, 2015) | 9 |
| Figura 2.5 Equipamentos ergonómicos Ergonomic Evolution (2015); Ds-Ergonomics (2015); Ergo Care (2015) | 10 |
| Figura 2.6- <i>Ergo-arm</i> modelo <i>D57</i> da marca <i>Desoutter</i> (Desoutter - Industrial Tools, 2010) | 10 |
| Figura 2.7- Representação simples de um parafuso (Portal Met@alica, 2008) | 12 |
| Figura 2.8- Principais partes de um parafuso (Wonkee Donkee Tools, 2015) | 12 |
| Figura 2.9- Representação dos principais conceitos teóricos de um parafuso (Portal Met@alica, 2008) .. | 14 |
| Figura 2.10 Parafusos passantes (Portal Met@alica, 2008) | 15 |
| Figura 2.11 Parafusos não passantes (Portal Met@alica, 2008) | 15 |
| Figura 2.12 <i>Machine screws</i> (Ebay UK, 2015) | 16 |
| Figura 2.13 Diferentes tipos de acionamento: <i>Slotted</i> (à esquerda) (Amazon, 2015), <i>TORX®</i> (Chrome Bolt, 2004) e geometria (LandEFeld, 2014) (no meio) e <i>Phillips</i> (à direita) (Amazon, 2015) | 16 |
| Figura 2.14 Parafuso <i>TORXPLUS®</i> e respetiva geometria (Exx.se, 2015), (Helman CNC, 2012) | 17 |
| Figura 2.15 Acionamento hexagonal simples e do tipo quadrado, (Amazon, 2015); (mental_floss, 2013) | 17 |
| Figura 2.16 Processo de <i>countersinking</i> (Silverfish Longboarding, 2013) | 18 |
| Figura 2.17 Parafusos autorroscantes do tipo <i>thread-cutting</i> (Indiamart, 2015) | 19 |
| Figura 2.18 Parafusos autorroscantes do tipo <i>thread-forming</i> (Shen Chou Fasteners Industrial, 2015).... | 20 |
| Figura 2.19 Parafusos autorroscantes usados i) <i>Taptite®</i> ii) <i>Spiralform</i> iii) <i>Delta PT®</i> iv) <i>Magtite®</i> (Delphi E&S, 2007) | 21 |
| Figura 2.20 Vista de cima de um “dispositivo” de trabalho | 22 |
| Figura 2.21 Vista de frente de um “dispositivo” de trabalho | 23 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.22 Base de aparafusamento..... | 23 |
| Figura 2.23 Posto individual de trabalho..... | 24 |
| Figura 2.24 Linha de produção | 25 |
| Figura 2.25 Peças metálicas | 26 |
| Figura 2.26 Peças plásticas | 26 |
| Figura 3.1 Processo de aperto de um parafuso (Delphi E&S, 2007) | 30 |
| Figura 3.2 Medidor de binário analógico e digital (Allbiz, 2013); (PCE Instruments, 2015)..... | 30 |
| Figura 3.3 Relação entre binário e carga de aperto para diferentes parafusos (Anochrome Group, 2015) | 31 |
| Figura 3.4 Fatores que intervêm na relação entre binário e pré-carga, em forma de gráfico e em representação real (Delphi E&S, 2005)..... | 32 |
| Figura 3.5 Quatro fases de aparafusamento (Atlas Copco, 2006)..... | 34 |
| Figura 3.6 Espiras de um <i>machine screw</i> e respetivo furo roscado (Atlas Copco, 2006) | 34 |
| Figura 3.7 Penetração das espiras dos parafusos autorroscantes (Delphi E&S, 2007) | 35 |
| Figura 3.8 Profundidade e comprimento de encaixe de espiras (Delphi E&S, 2011) | 35 |
| Figura 3.9 Furo (National Maritime Research Institute, 2003) | 38 |
| Figura 3.10 Parafuso com cabeça do tipo de anilha (Melfast, 2014) | 38 |
| Figura 3.11 Diâmetro mínimo e máximo do furo para diferentes tamanhos de parafusos (National Maritime Research Institute, 2003) | 39 |
| Figura 3.12 Junta do tipo <i>hard joint</i> (Atlas Copco, 2007) | 40 |
| Figura 3.13 Junta do tipo <i>soft joint</i> (Atlas Copco, 2007)..... | 41 |
| Figura 3.14 Alguns mecanismos secundários de aperto (Bollhoff, 2013)..... | 41 |
| Figura 3.15 Aperto numa <i>hard joint</i> e <i>soft joint</i> (Delphi E&S, 2008) | 42 |
| Figura 3.16 Processo de relaxamento de junta (Mountz, 2015)..... | 43 |
| Figura 3.17 Duas curvas que ilustram a variação de 30 rundowns num furo aberto (Delphi E&S, 2008) | 46 |
| Figura 3.18 Representação dos momentos de sentar e romper parafusos respetivamente (Delphi E&S, 2008) | 47 |
| Figura 3.19 Representação da janela de binário (Delphi E&S, 2008)..... | 48 |
| Figura 3.20 Estabelecer a regra do polegar (Delphi E&S, 2008)..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.21 Processo de aperto de um parafuso autorroscante num furo passante (Delphi E&S, 2005) | 50 |
| Figura 3.22 Processo de aperto de um parafuso autorroscante num furo cego (Delphi E&S, 2005) | 51 |
| Figura 3.23 Processo de aperto de um parafuso do tipo machine screw num furo cego pré-roscado (Delphi E&S, 2005) | 52 |
| Figura 3.24 Processo de aparafusamento estabelecendo a relação entre binário e ângulo (Delphi E&S, 2008) | 54 |
| Figura 4.1 Parafusos mal "sentados" | 59 |
| Figura 4.2 Parafuso com cabeça moída (Thumper Talk, 2008) | 59 |
| Figura 4.3 Espiras danificadas (New Metal Worker, 2014) | 60 |
| Figura 4.4 Peça apertada com parafuso a menos | 60 |
| Figura 4.5 Peça apertada com parafuso a mais | 60 |
| Figura 4.6 Danos na placa <i>PCB</i> (Over Clock, 2010) | 61 |
| Figura 4.7 Representação da direção da força da gravidade (Engineering Toolbox, 2015) | 63 |
| Figura 5.1 Protótipo 1 (à esquerda) e protótipo 2 (à direita) | 66 |
| Figura 5.2 <i>Arduino Nano</i> (Solid, 2011) | 68 |
| Figura 5.3 <i>IMU</i> (Ebay, 2015) | 69 |
| Figura 5.4 Botão (Aquário, 2015) | 70 |
| Figura 5.5 LCD <i>Nokia 5510</i> (Speedytek, 2015) | 70 |
| Figura 5.6 <i>Buzzer</i> (FastTech, 2013) | 71 |
| Figura 5.7 Componentes eletrónicos | 71 |
| Figura 5.8 Disposição dos componentes eletrónicos pela placa <i>PCB</i> | 72 |
| Figura 5.9 Teste de funcionamento numa placa de ensaio | 73 |
| Figura 5.10 Primeiro passo do processo de medição | 75 |
| Figura 5.11 Segundo passo do processo de medição | 75 |
| Figura 5.12 Terceiro passo do processo de medição | 76 |
| Figura 5.13 Representação e cálculo matemático do produto interno entre dois vetores (In SlideShare, 2014) | 76 |
| Figura 5.14 Fórmula de produto interno entre dois vetores em formato de código computacional | 77 |
| Figura 5.15 Quarto passo do processo de medição | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.16 Quinto passo do processo de medição..... | 78 |
| Figura 5.17 “Braçadeira” original..... | 80 |
| Figura 5.18 "Braçadeira" alterada..... | 80 |
| Figura 5.19 Zona a realizar o furo para ligação com a caixa..... | 81 |
| Figura 5.20 “Braçadeira” em formato digital..... | 81 |
| Figura 5.21 Primeira ideia para a caixa..... | 82 |
| Figura 5.22 Ideia final para a caixa..... | 83 |
| Figura 5.23 Caixa e tampa em formato digital e respetiva legenda..... | 84 |
| Figura 5.24 Placa <i>PCB</i> alterada..... | 85 |
| Figura 5.25 Conjunto eletrónico montado..... | 86 |
| Figura 5.26 Impressora <i>3D</i> | 86 |
| Figura 5.27 Caixa real..... | 87 |
| Figura 5.28 Tampa vista de frente e de trás em formato real..... | 87 |
| Figura 5.29 Ligação de encaixe entre “braçadeira” e caixa..... | 89 |
| Figura 5.30 Parafusos M5 e respetivas anilhas..... | 89 |
| Figura 5.31 Representação da profundidade e localização dos furos..... | 90 |
| Figura 5.32 Furo roscado para ligação com a caixa..... | 90 |
| Figura 5.33 Ligação aparafusada entre “braçadeira” e caixa..... | 91 |
| Figura 5.34 Parafusos <i>PT® M2.2x7</i> | 91 |
| Figura 5.35 Disposição dos furos do <i>PCB</i> e da tampa..... | 92 |
| Figura 5.36 Representação dos aspetos dimensionais para parafusos <i>PT®</i> (Stanley Engineered Fastening, 2015)..... | 93 |
| Figura 5.37 Ligações entre <i>PCB</i> e caixa, na parte superior (em cima) e na parte inferior da caixa (em baixo)..... | 95 |
| Figura 5.38 Ligação aparafusada entre tampa e caixa..... | 98 |
| Figura 5.39 Protótipo em formato digital..... | 98 |
| Figura 5.40 Protótipo em formato real..... | 99 |
| Figura 5.41 Cabo <i>USB</i> macho/fêmea (à esquerda) e cabo <i>USB</i> mini (à direita)..... | 99 |
| Figura 5.42 Interruptor do tipo <i>ON/OFF</i> | 100 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.43 Circuito eletrônico para o segundo protótipo | 101 |
| Figura 5.44 Tampa nova e respectiva legenda..... | 101 |
| Figura 5.45 Reforços da nova tampa..... | 102 |
| Figura 5.46 Disposição e dimensões dos reforços | 103 |
| Figura 5.47 Reforços e suportes da pilha | 104 |
| Figura 5.48 Tampa em formato real e pilha de 9V..... | 104 |
| Figura 5.49 Adesivo de colagem bilateral | 105 |
| Figura 5.50 Pilha fixa com adesivo e furos para o interruptor..... | 105 |
| Figura 5.51 Parafusos M1.95x12..... | 106 |
| Figura 5.52 Protótipo 2 em formato digital | 108 |
| Figura 5.53 Protótipo 2 em formato real..... | 109 |
| Figura 5.54 Teste da parte mecânica | 110 |
| Figura 5.55 Teste de repetibilidade em mesa de aparafusamento..... | 112 |
| Figura 5.56 Teste de repetibilidade em máquina de aparafusar | 113 |
| Figura 5.57 Histograma dos resultados obtidos..... | 114 |
| Figura 5.58 Medição nas máquinas de aparafusar | 115 |
| Figura 5.59 Medição em base de aparafusamento | 116 |
| Figura 5.60 Medição em “dispositivo” de aparafusamento | 117 |

Lista de tabelas

| | |
|--|-------------------------------------|
| Tabela 2.1 Especificações das máquinas <i>Atlas Copco</i> | 6 |
| Tabela 2.2 Especificações das máquinas <i>Desoutter</i> | 6 |
| Tabela 2.3 Vantagens e desvantagens do <i>ergo-arm D57</i> (Desoutter - Industrial Tools, 2013) | 11 |
| Tabela 2.4 Partes principais de um parafuso e respectivas definições..... | 13 |
| Tabela 2.5 Definição dos principais conceitos teóricos de um parafuso (IHS Engineering 360, 2015), (Carmélio, 2006) | 14 |
| Tabela 2.6 Tipos de acionamento e tamanhos usados dos <i>machine screws</i> | 18 |
| Tabela 2.7 Tipos de acionamento e tamanhos usados nos parafusos autorroscantes | 21 |
| Tabela 2.8 Características dos parafusos autorroscantes (Delphi E&S, 2007) | 21 |
| Tabela 3.1 Fatores que influenciam a fricção durante o processo de aparafusamento (parte 1) | 32 |
| Tabela 3.2 Fatores que influenciam a fricção durante o processo de aparafusamento (parte 2) | 33 |
| Tabela 3.3 Soluções para o relaxamento da junta (parte 1) (Mountz, 2015) | 43 |
| Tabela 3.4 Soluções para o relaxamento da junta (parte 2) (Mountz, 2015) ... | Erro! Marcador não definido. |
| Tabela 3.5 Erros detetáveis pela monitorização angular | 53 |
| Tabela 3.6 Testes de verificação de binário (parte 1) (Mountz, 2015)..... | 55 |
| Tabela 3.7 Testes de verificação de binário (parte 2) (Mountz, 2015)..... | 56 |
| Tabela 5.1 Lista de peças dos protótipos a desenvolver (parte 1)..... | 66 |
| Tabela 5.2 Lista de peças dos protótipos a desenvolver (parte 2)..... | 67 |
| Tabela 5.3 Dimensões usadas para os <i>bosses</i> e furos do <i>PCB</i> | 94 |
| Tabela 5.4 Dimensões usadas para os <i>bosses</i> e furos da tampa..... | 96 |
| Tabela 5.5 Dimensões usadas para os furos passantes da tampa..... | 97 |
| Tabela 5.6 Dimensões dos <i>bosses</i> e furos da nova tampa (parte 1) | 107 |
| Tabela 5.7 Dimensões dos <i>bosses</i> e furos da nova tampa (parte 2) | 108 |
| Tabela 5.8 Resultados de medições em mesa de aparafusamento..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 5.9 Resultados de medições em máquinas de aparafusar | 113 |
| Tabela 5.10 Registo dos valores angulares das máquinas de aparafusar em modo <i>offline</i> | 116 |
| Tabela 5.11 Registo dos valores angulares das bases e “dispositivos” de aparafusamento..... | 117 |
| Tabela 5.12 Procedimento de aplicação do dispositivo de perpendicularidade..... | 118 |

Abreviaturas e Símbolos

IMU – Inertial Measurement Unit

LSL- Lower specification level

USL - Upper specification level

Nok - Not Ok

$\pi = 3.1416$

F_i - Carga de aperto (N)

K - Fator de fricção

K_1 - Fator de fricção da rosca

K_2 - Fator de fricção das superfícies dos rolamentos

T - Binário aplicado (N.mm)

D - Diâmetro nominal do parafuso (mm)

n - Número de espiras

Capítulo 1 Introdução

Quando se pensa em técnica de aparafusamento, surge a simples ideia de um furo dentro das especificações, um parafuso adequado e num método de o aparafusar, quer seja manual ou automático. Contudo, em ambiente industrial, um processo de aparafusamento é bem mais complexo do que aparenta, isto porque o objetivo principal é a produção rápida e eficaz. Na empresa, o parafuso é a base das ligações mecânicas pelo que este processo representa um elevado risco económico, se não for executado corretamente, correspondendo à terceira maior causa de autorrádios defeituosos.

Para aumentar a complexidade deste processo, existem inúmeras variáveis que fazem com que o aparafusamento ocorra com sucesso, ou não. Para tal, inicia-se um estudo com uma vertente teórico-prática centrado em todos os equipamentos, peças e máquinas de forma a identificar tudo o que é usado no processo de aparafusamento e respetivas restrições.

Por outro lado, realizou-se um outro estudo mas com uma vertente mais teórica para perceber o processo em si, bem como as partes principais de que depende e algumas considerações. Explica-se, assim, o objetivo principal do aparafusamento, algumas considerações relevantes para tanto parafuso e junta, terminando com alguns estudos de avaliação do processo de aperto.

A participação num estágio profissional na empresa em muito facilitou a resolução deste problema, através do contacto direto com o ambiente industrial, lidando com centenas de operários e engenheiros e, posteriormente, adquirindo um maior conhecimento profissional.

Tendo esta minuciosa análise completa passou-se à identificação dos erros mais comuns de aparafusamento, centrando-se cada vez mais na empresa em questão. Avaliando todos os erros, chegou-se à conclusão que vários problemas advinham de um só, da “falta” de perpendicularidade entre mesa de aparafusamento e máquina de aparafusar. Posto isto, fez-se a definição do problema, porque é que ele ocorre e quais são as implicações da sua ocorrência. Ainda antes de atingir a solução final e para facilitar o desenvolvimento deste processo, estabeleceu-se um passo crítico, a definição de todos os requisitos que a solução teria de apresentar para corresponder aos objetivos impostos.

A partir do momento em que tudo estava definido passou-se à prática, arranjar forma de medir esse ângulo. A solução centrou-se em construir um dispositivo que o pudesse fazer e que respeitasse todos os requisitos anteriormente definidos.

Finalmente, seguiram-se os testes e análises para verificar se os resultados obtidos com o novo produto contribuíram para a resolução do problema proposto.

1.1 Objetivos

O desenvolvimento de um projeto curricular em ambiente empresarial pode ser uma experiência enriquecedora, razão pela qual se definiu previamente o que era interessante alcançar. Foi assim definido que os principais objetivos deste projeto seriam obter a máxima experiência profissional possível e contribuir para um melhor processo produtivo da empresa. A presença diária num meio profissional tornaria alcançável o primeiro objetivo pelo que só por si representou uma mais-valia.

O segundo objetivo centrou-se em resolver o problema da perpendicularidade e provar que isso foi feito com sucesso. Uma solução rápida para este problema seria aumentar a área de contacto entre máquina de aparafusar e *ergo-arm*, aumentando a estabilidade da ligação, ou adicionar mais um contacto, ao invés de se ter uma garra de ligação ter-se-iam duas. No entanto, o que foi pedido pelo grupo de aparafusamento foi descobrir a melhor forma de medir a orientação da máquina de aparafusar relativamente à sua mesa, como se verifica na Figura 1.1, admitindo para tal que a mesa estaria corretamente alinhada.

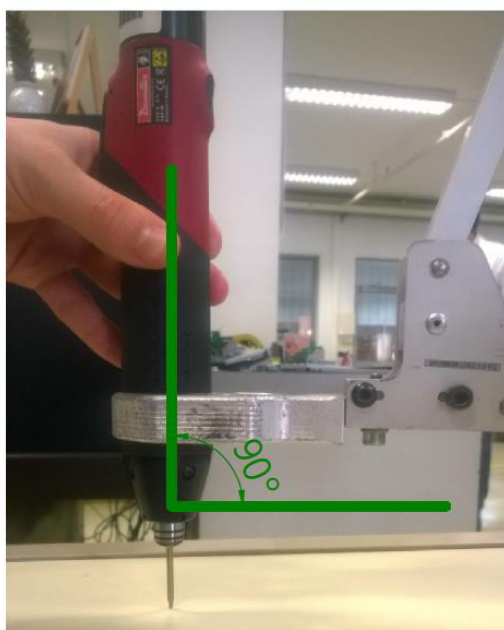


Figura 1.1 Máquina de aparafusar e mesa de aparafusamento

O ponto de partida deste projeto focou-se na definição de um dispositivo que fosse capaz de se adaptar a dois objetos de estudo diferentes. Isto porque, por um lado, tem-se uma máquina de aparafusar com uma forma específica e, por outro, uma mesa, uma base ou um "dispositivo", estruturas horizontais. Além disso, o dispositivo terá de conter e proteger um sistema de medição adequado e ter a capacidade para medir e registar dados angulares com alguma precisão.

O objetivo deste projeto centra-se, então, na recolha de dados sobre a perpendicularidade existente entre os equipamentos. Assim, seria possível averiguar a fiabilidade dos equipamentos usados na linha de produção, como *ergo-arms*, máquinas de aparafusar, bases e "dispositivos". Por outro lado, este projeto facilitaria, em caso de erro, o processo de "calibração" dos equipamentos e, conseqüentemente solucionar o problema apresentado. Visto que, até à data, não tinha sido feita nenhuma medição precisa, tornou-se um projeto bastante aliciante.

Finalmente, interessa fazer a validação do dispositivo para saber se este realmente funciona com sucesso e se contribui para o processo produtivo ou se é mais um empecilho para atrasar a cadência de produção.

1.2 Apresentação da empresa

Delphi é uma empresa norte-americana e uma das maiores no ramo automóvel, possui escritórios e fábricas em 32 países e conta com cerca de 161 mil trabalhadores em todo o mundo (Delphi, s.d.). Fundada em 1965 tomou inicialmente o nome *Grundig* e entrou no mercado de trabalho com produtos inovadores. Começou por desenvolver produtos áudio e *Hi Fi*, televisões a preto e branco, telefones sem fios e autorrádios. Apenas em 2003 adquiriu o nome atual e desde então centrou-se na manufatura de peças automotivas e na criação de soluções para mercados automóveis, tornando os veículos mais seguros, sustentáveis e interligados. Foi nesse mesmo ano que se construiu a planta de Braga, contudo esta focou-se apenas na produção de autorrádios, *displays* e antenas.

Em termos globais, várias são as áreas para as quais a *Delphi* serve e desenvolve produtos, tais como, Sistemas térmicos, *Powertrain Systems*, Arquitetura Elétrica/Eletrónica, *aftermarket* e Eletrónica & Segurança, suportando veículos comerciais e militares e sistemas térmicos comerciais e residenciais.

A *Delphi* pretende ser a líder global do mercado automóvel mas para tal tem de haver um pleno consenso entre fornecedores, colaboradores e acionistas de forma a se introduzirem novos conceitos que permitam criar produtos com maior qualidade e com um menor custo associado.

1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos, correspondendo de uma forma geral à introdução, estado de arte e projeto.

O primeiro capítulo inicia-se com a introdução onde é realizada uma síntese do que vai ser feito ao longo da dissertação. Seguem-se os objetivos, centrando-se conjuntamente no projeto e no estágio. Por último, é feita uma apresentação da empresa, explicando brevemente a *Delphi E&S*.

O segundo e terceiro capítulos são referentes ao estado de arte, onde é feita uma descrição do problema e respetivas variáveis. Assim, por um lado, introduzem-se todos os equipamentos necessários para que um processo de aparafusamento industrial ocorra e, por outro, explica-se alguma da teoria que lhe é adjacente.

O quarto e quinto capítulos são mais práticos e referentes ao projeto desenvolvido ao longo do estágio. Inicialmente, é feito um levantamento dos problemas mais comuns para posteriormente se “selecionar” e definir-se um. Concluída esta fase, passa-se para o desenvolvimento e validação da solução protótipo, correspondente ao capítulo 5.

Para concluir, segue-se o capítulo 6 onde se discutem as conclusões, limitações inerentes ao projeto e possíveis melhoramentos a executar.

Capítulo 2 Componentes de aparafusamento

Como anteriormente referido, para um processo de aparafusamento simples apenas se necessita de um parafuso, um furo e uma chave adequada. Contudo, em ambiente empresarial este processo é um pouco diferente, pois os dois principais objetivos são a produção rápida e cuidada, de forma a satisfazer as necessidades dos clientes e de se adaptar aos requisitos dos fornecedores.

Assim, neste capítulo será feita uma análise de todos os elementos que contribuem para um bom processo de aparafusamento, centrando-se apenas nos usados pela empresa.

2.1 Máquinas de aparafusar

Como o próprio nome indica, máquina de aparafusar tem o objetivo de apertar um parafuso num furo podendo também fazer o oposto, o desaperto. A empresa serve-se de dois tipos de máquinas, as manuais e as controladas digitalmente, chamadas robôs. Visto o projeto ser focado no melhoramento do aparafusamento manual, apenas vai ser feito um estudo relativo a este tipo de máquinas.

Existe uma vaga enorme de máquinas manuais, com diversas formas, tipos de aplicação e de funcionamento, todavia apenas se vai centrar nas usadas na empresa. Deste modo, a empresa serve-se de máquinas eletrónicas de duas marcas principais: *Desoutter* e *Atlas Copco*. Não há uma razão especial para a empresa servir-se de duas marcas diferentes, talvez pelo estado evolutivo das marcas na altura da compra ou por razões económicas.

Em termos de características, ambas as marcas possuem máquinas com elevada precisão, qualidade e resistência mecânica para corresponderem à elevada cadência de produção. Além disso, detêm elevadas capacidades ergonómicas, são máquinas leves, compactas e com uma empunhadura suave. Tornam-se por isso máquinas muito práticas e confortáveis, de pouco ruído e pouca vibração.

Os únicos parâmetros, que variam, são as variáveis de aparafusamento, o binário e a velocidade de rotação aplicados. No entanto, estas são características que além de variarem de marca para marca também o fazem de modelo para modelo, dentro da mesma marca. Assim, e com dados internos, realizaram-se duas tabelas com informação referente a estas variáveis, a Tabela 2.1 para a marca *Atlas Copco* e a Tabela 2.2 para a marca *Desoutter*. Em adição e para dar uma noção mais visual associou-se a cada marca uma imagem da máquina usada, tendo-se a Figura 2.1 para a marca *Atlas Copco* e a Figura 2.2 para a marca *Desoutter*.

Tabela 2.1 Especificações das máquinas *Atlas Copco*

| <i>Atlas Copco</i> | | |
|---|-----------------------------------|------------------|
| Gama | Janela de binário ($N \cdot m$) | Velocidade (rpm) |
| <i>Microtorque ETD M 120 ABL</i> <i>400B</i> | [0.3 – 1.2] | 950 |
| <i>Microtorque ETD M 80 ABL</i> | [0.2 – 0.8] | 1300 |



Figura 2.1 Máquina de aparafusar *Atlas Copco*- *Microtorque ETD M 80 ABL* (Flexible Assembly, 2015)

Tabela 2.2 Especificações das máquinas *Desoutter*

| <i>Desoutter</i> | | | |
|------------------|-------------|-----------------------------------|------------------|
| Gama | Modelo | Janela de binário ($N \cdot m$) | Velocidade (rpm) |
| <i>ECS</i> | <i>ECS7</i> | [1.9 – 7.5] | 1800 |
| | <i>ECS4</i> | [1 – 4] | 2000 |
| <i>ERS</i> | <i>ERS2</i> | [0.6 – 2.5] | 300 |



Figura 2.2 Máquina de aparafusar *Desoutter – ERS* (Assembly Mag, s.d.)

Visto o mercado destes equipamentos estar muito desenvolvido, não fazia sentido comparar as características das diferentes marcas pois são muito semelhantes razão pela qual se centrou o estudo comparativo apenas na marca *Desoutter*.

Ambas as gamas *ERS* e *ECS* são muito idênticas em termos de características físicas e de qualidade ergonómica, visto que possuem motor sem escovas, não têm necessidade de manutenção, têm grande qualidade eletrónica, garantindo inícios e fins de produção suaves e níveis de binário precisos.

Existiam algumas diferenças que vão ser explicadas: a gama *ECS* é definida como a máquina para todas as necessidades de aperto, oferecendo uma elevada precisão de binário e, por isso, usada para operações que requerem um grande nível de qualidade. Além disto, apresentam uma velocidade incomparável, permitindo uma maior cadência e uma maior produção. (Desoutter, Industrial Tools, 2012) Por outro lado, a gama *ERS* é a máquina mais completa da marca *Desoutter* apresentando igualmente elevada precisão, rastreabilidade e *error proofing*, isto é conseguido através da tecnologia “transdutora”, ou seja, esta máquina possui um transdutor de binário. (Desoutter - Industrial Tools, 2009); (EUROPNEUMAQ, 2015) O que acontece é que este dispositivo transforma o binário aplicado pela máquina de aparafusar num sinal elétrico e transmite-o. Desta forma, é possível realizar o aperto de um parafuso e receber o valor do binário aplicado.

Os controladores são equipamentos programados para estabelecer processos de trabalho, limitados por valores máximos e mínimos, que são transmitidos para as máquinas. Para este caso particular das máquinas *Desoutter*, o controlador usado é o *CVIV II*. Este apresenta até 15 ciclos de produção diferentes, cada um contendo 15 fases diferentes, permitindo escolher a melhor estratégia de aperto para cada aplicação. Um exemplo desta característica é a possibilidade de seleccionar uma velocidade mais elevada para encostar o parafuso na junta e outra mais baixa para realizar o aperto, evitando binário excessivo e mantendo a melhor qualidade de aperto. Além disto, conseguem transmitir diferentes binários, algo que não era comum nas máquinas pneumáticas. Finalmente, possibilitam a configuração de um *batch* (arquivo de lote) que permite automatizar

tarefas como, por exemplo, confirmar se a estratégia de aperto foi usada em todos os parafusos. Isto é conseguido, por exemplo, através da verificação de limites de binário e de ângulo anteriormente definidos. (Desoutter - Industrial Tools, 2010) (EUROPNEUMAQ, 2015)



Figura 2.3 Máquina de aparafusar *Desoutter* e controlador *CVI II* (Desoutter - Industrial Tools, 2009)

Para auxiliar o operador, há sempre a presença de um ecrã que mostra todo o procedimento de aparafusamento. Portanto, sempre que algo não corresponder ao que foi anteriormente programado no controlador, aparece no ecrã como “mau” ou *nok* e o processo é interrompido. Os controladores não só funcionam como o “motor” da operação de aparafusamento, mas também agem como o “cérebro” da mesma, registando e guardando todos os resultados. Isto apresenta uma grande vantagem, pois ao fim de cada aparafusamento mal efetuado, é possível rever os valores registados e ter uma ideia do que está mal, quer seja máquina, parafuso, peça ou operador. Com isto, pode-se criar um conjunto de dados estatísticos dos problemas mais comuns ao longo do tempo, tornando mais clara a mudança a efetuar e como realizá-la.

2.2 *Bits* de aparafusamento

O *bit*, representado na Figura 2.4, é uma ferramenta metálica que pode ser usada para dois trabalhos simples, aparafusar ou desaparafusar. Nesta específica indústria dos autorrádios, o *bit* assume a função de conduzir o parafuso ao respetivo furo ou removê-lo do mesmo.

De forma a facilitar o processo de produção, os *bits* são magnetizados nas pontas sendo capazes de segurar o parafuso, permitindo que o processo de aparafusamento seja possível de executar rápida e eficazmente.

O processo de seleção do *bit* é, de um modo geral, muito simples e fácil de entender. Assim, apenas tem de se garantir que o *bit* é correspondente à cabeça do parafuso a usar, tendo o comprimento e material mais adequado. Se se tiver uma peça que apresenta um furo de comprimento curto, deve-se usar um *bit* igualmente curto. Se, por outro lado, for usado um “dispositivo”, peça que serve para guiar o parafuso ao respetivo furo, será necessário usar um *bit* um pouco mais comprido, de forma a penetrar o “dispositivo” e alcançar o furo na peça a ser ligada.



Figura 2.4 *Bits* de aparafusamento (Ebay UK, 2015)

Os *bits* usados na produção apresentam um acionamento do tipo *TORX®* e *TORX® PLUS* que vão ser discutidos na secção dos parafusos. São, geralmente, feitos em aço ou aço inoxidável pois são sujeitos a alguma temperatura e baixos binários, mas durante grandes intervalos de tempo pelo que a resistência é uma necessidade. Podem ser revestidos com outros materiais tais como titânio e diamante para aumentar ainda mais a capacidade de resistir a cadências de produção muito elevadas. (Tool Cobber, 2012)

2.3 Ergo-arms

Equipamentos ergonômicos são aparelhos que têm como principal objetivo tornar os métodos de produção mais saudáveis e precisos, fornecendo inúmeras vantagens tanto para o operador como para o processo. Cadeiras de escritório e produção, ratos e visores de computadores são apenas alguns exemplos, apresentados na Figura 2.5.



Figura 2.5 Equipamentos ergonômicos Ergonomic Evolution (2015); Ds-Ergonomics (2015); Ergo Care (2015)

No entanto, na indústria específica do aparafusamento, um *ergo-arm* é um mecanismo metálico que pode ser rodado 180° em torno do seu eixo e ainda permitir um alcance horizontal e vertical.

A empresa usa, tal como para as máquinas de aparafusar, a marca *Desoutter*, servindo-se do modelo *D57*, que se encontra na Figura 2.6. Neste caso, este *ergo-arm* permite um alcance horizontal até 700 milímetros e vertical até 550 milímetros conseguido através da incorporação de duas peças articuladas e respetivas suspensões. (Desoutter - Industrial Tools, 2013) Contudo, existem diversos tipos de *ergo-arms* pelo que estas variáveis podem ser alteradas consoante marca e modelo.



Figura 2.6- Ergo-arm modelo *D57* da marca *Desoutter* (Desoutter - Industrial Tools, 2010)

De seguida, na Tabela 2.3, comparasse os prós e os contras em adquirir um equipamento deste tipo.

Tabela 2.3 Vantagens e desvantagens do *ergo-arm D57* (Desoutter - Industrial Tools, 2013)

| <i>Ergo-arm D57</i> | |
|---|--|
| Vantagens | Desvantagens |
| Suporte ergonómico para máquinas de aparafusar | Acarreta um maior custo financeiro, dependendo da qualidade e especificações |
| Reage aos binários aplicados nas peças de trabalho e equilibra o seu peso | |
| Redução da fadiga dos operadores | |
| Aumento da produtividade, consistência e precisão do trabalho | |
| Garantia de perpendicularidade | |
| Movimentos precisos pelas suas específicas tolerâncias | |

Assim, muitas são as vantagens que este equipamento traz tanto a operador como ao processo de aparafusamento, apresentando apenas o custo como um pequeno obstáculo. Com tudo isto, facilmente se percebe que um *ergo-arm* é uma mais-valia para um maior e melhor processo produtivo de qualquer empresa.

2.4 Parafusos

O parafuso é, em linguagem corrente, uma peça de metal, madeira ou plástico com formato cilíndrico ou cónico. Apresenta sulcos em espiral ao longo do seu corpo e a sua extremidade superior, a cabeça, é adaptada a diversas ferramentas de fixação como chave de fenda, chave de boca, chave inglesa, entre outros modelos. (IHS Engineering 360, 2015)

A principal função do parafuso é ser um ligador mecânico, um elemento de fixação não permanente de duas ou mais peças, combinadas ou em junções diferentes. O processo de fixação é conseguido através da conversão de um binário numa força linear, podendo também servir-se de outros elementos secundários, tais como porcas, anilhas e adesivos.

Em geral, o parafuso é dividido em duas partes principais, a cabeça e o corpo, como se observa na Figura 2.7.

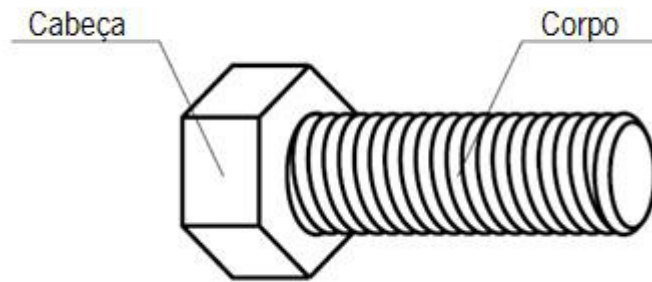


Figura 2.7- Representação simples de um parafuso (Portal Met@alica, 2008)

No entanto, isto nem sempre é verdade pois os parafusos variam consoante a cabeça, a haste, a rosca, o tipo de acionamento e a ponta.

Assim, alterando alguma destas variáveis encontra-se uma infinidade de diferentes tipos de parafusos, contudo cada tipo de parafuso está intimamente ligado a uma específica aplicação, pelo que deve ser tomado em conta em termos de dimensionamento da ligação. (IHS Engineering 360, 2015), (Carmélio, 2006)

De seguida, vão ser apresentados os conceitos mais significativos de um parafuso. Em primeiro lugar, vai ser dada uma explicação das partes que constituem um parafuso, na Tabela 2.4, com a respetiva representação na Figura 2.8. Em segundo lugar, na Tabela 2.5 vão ser explicados os conceitos teóricos importantes para o seu estudo, com a respetiva representação na Figura 2.9.

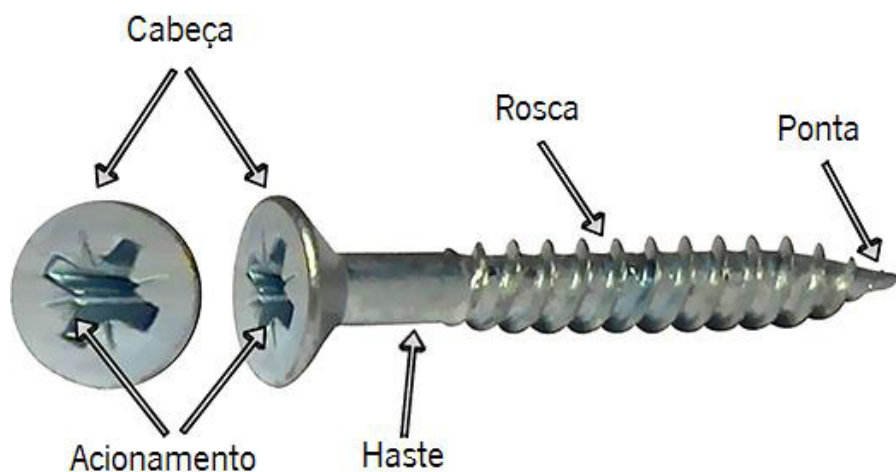


Figura 2.8- Principais partes de um parafuso (Wonkee Donkee Tools, 2015)

Tabela 2.4 Partes principais de um parafuso e respetivas definições

| Partes principais de um parafuso | Definição | Objetivos |
|----------------------------------|---|--|
| Cabeça | Extremidade superior do parafuso | <ul style="list-style-type: none"> • Permite uma paragem mecânica durante o aperto; • Mantém a fixação; • Recebe as ferramentas de aperto. |
| Haste | Zona lisa do corpo do parafuso | <ul style="list-style-type: none"> • Permite que o parafuso rode livremente nesta parte mas garante que o mesmo é apertado na zona roscada; • Recebe porcas e anilhas. |
| Rosca | Estrutura helicoidal do parafuso | <ul style="list-style-type: none"> • Permite que o parafuso avance linearmente quando rodado; • Responsável por acomodar-se no furo e estabelecer o contacto e consequente fixação interna. |
| Acionamento | Zona localizada na superfície da cabeça do parafuso | <ul style="list-style-type: none"> • Responsável por receber as ferramentas de fixação. |
| Ponta | Extremidade inferior do parafuso | <p>Responsável por iniciar o contacto com a peça e pode apresentar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma afiada, para furar em peças de estrutura dúctil (madeira ou plástico) • Forma achatada, para materiais metálicos, • Outras formas, como a dentada. |

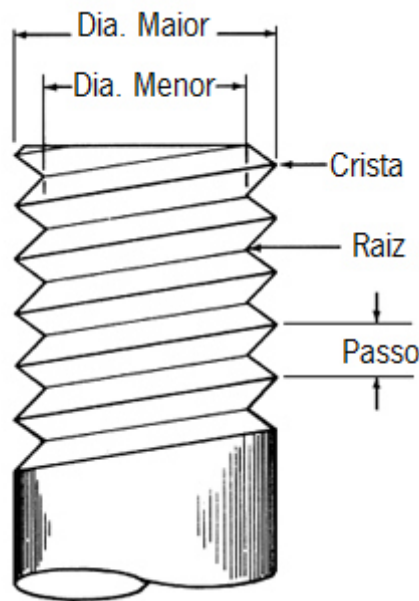


Figura 2.9- Representação dos principais conceitos teóricos de um parafuso (Portal Met@alica, 2008)

Tabela 2.5 Definição dos principais conceitos teóricos de um parafuso (IHS Engineering 360, 2015), (Carmélio, 2006)

| Conceitos principais | Definições |
|----------------------|---|
| Diâmetro maior | Diâmetro nominal do parafuso ou, a distância entre a crista de um lado do parafuso à crista do outro lado |
| Diâmetro menor | Distância entre a raiz de um lado do parafuso à raiz do lado oposto |
| Raiz | Zona inferior do filete de rosca |
| Crista | Zona correspondente ao ponto mais alto da espira |
| Passo | Corresponde à distância entre duas cristas consecutivas |

2.4.1 Classificação quanto à função

Nesta secção é dada uma explicação do modo como os parafusos são aplicados nos furos, sendo feito apenas um estudo centrado nos casos empregues na empresa.

2.4.1.1 Parafusos passantes

Parafusos passantes são os que atravessam ambas as peças a ligar de lado a lado. Inserem-se em furos roscados e necessitam de porca para fixação, podendo ter contraporca e anilhas, como se pode verificar na Figura 2.10. Os parafusos passantes podem possuir cabeça ou não. (Portal Met@alica, 2008)

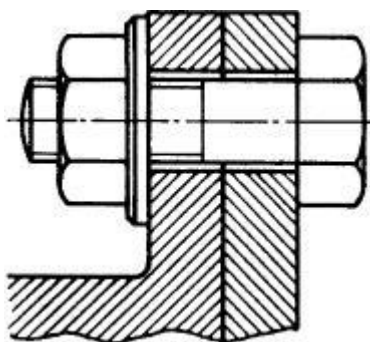


Figura 2.10 Parafusos passantes (Portal Met@alica, 2008)

2.4.1.2 Parafusos não passantes

Parafusos que ao contrário dos anteriores não atravessam por completo ambas as peças. Como se verifica na Figura 2.11, vazam apenas a primeira peça mas estabelecem contacto com ambas através de furos cegos, de modo a obter a fixação desejável. (Portal Met@alica, 2008)

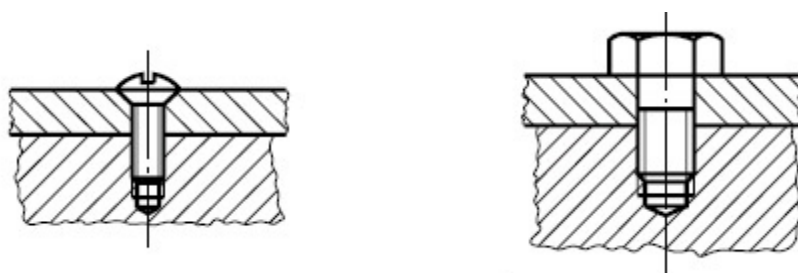


Figura 2.11 Parafusos não passantes (Portal Met@alica, 2008)

2.4.2 Classificação quanto ao tipo

Existe uma infinidade de parafusos com diferentes denominações, este facto deve-se essencialmente ao diferente uso dado a cada parafuso, às diferentes posições estabelecidas e às suas características individuais. Contudo, não vai ser feito um estudo tão minucioso. Assim, não se vai dar grande importância às diferentes características individuais (tipo de cabeça, rosca,

corpo, acionamento) bem como a todos os tipos de parafusos existentes no mercado, pois se tal fosse feito, tornaria esta secção muito monótona.

Desta forma, vai ser feito um estudo focado nos parafusos usados na empresa. Para tal, pode-se dividir os parafusos em duas classes: os *machine screws* e os autorroscantes, sendo que os segundos são os mais utilizados na empresa, correspondendo a 80-90% da sua totalidade.

2.4.2.1 Machine screws

Um *machine screw*, representado na Figura 2.12, é um parafuso que é tipicamente desenhado para ser apertado num furo roscado de uma peça metálica, usado por vezes em conjunto com uma porca correspondente.



Figura 2.12 *Machine screws* (Ebay UK, 2015)

Uma das formas de categorizar estes parafusos é através do tipo de atarraxamento, que vai determinar o tipo de ferramenta que guia o parafuso para o respetivo furo. Os dois principais tipos de acionamento usados são as de ponta *Slotted*, e *Phillips*, mas existem muitas outras que poderão também ser usadas tais como os *TORX®* (ponta em forma de estrela com seis vértices), todas representadas na Figura 2.13. As imagens na Figura 2.13 apenas representam o tipo de atarraxamento, não tendo em conta o tipo de parafuso representado.

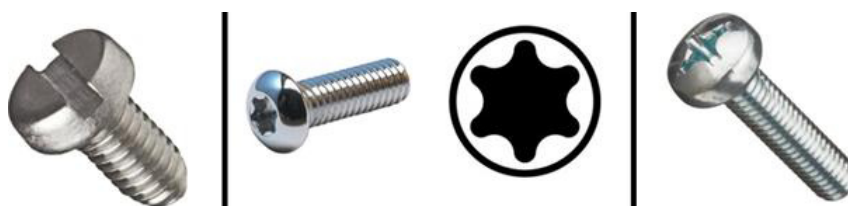


Figura 2.13 Diferentes tipos de acionamento: *Slotted* (à esquerda) (Amazon, 2015), *TORX®* (Chrome Bolt, 2004) e geometria (LandEFeld, 2014) (no meio) e *Phillips* (à direita) (Amazon, 2015)

Por outro lado, é necessário usar *machine screws* com formas especiais de atarraxamento por questões de segurança. Por exemplo, quando se tem uma placa elétrica com alto risco de electrocução não pode, ou não deve haver a possibilidade de tocar na placa. Desta forma, se a cabeça do parafuso possuir uma forma de atarraxamento menos comum, como o *TORXPLUS®*, representado na Figura 2.14, irá ser mais complexo arranjar uma ferramenta que o permita retirar, reduzindo o risco para quem o tentar fazer.



Figura 2.14 Parafuso TORXPLUS® e respetiva geometria (Exx.se, 2015), (Helman CNC, 2012)

Para outros casos mais frequentes e sem risco para a saúde, podem, por exemplo, usar-se cabeças de forma hexagonal ou quadrada, representadas na Figura 2.15, onde chaves mais comuns podem ser empregues.



Figura 2.15 Acionamento hexagonal simples e do tipo quadrado, (Amazon, 2015); (mental_floss, 2013)

A forma da cabeça destes parafusos vai determinar como é que se “sentam” ao fim de apertados no respetivo furo. Parafusos com cabeças redondas ou em forma de cúpula vão-se projetar para fora do furo, quando encaixados em superfícies planas. Estes são usados em zonas onde a montagem e desmontagem é uma constante e particularmente em materiais de espessura fina. Por outro lado, parafusos com cabeças planas são desenhados para ficarem completamente embebidos no furo, ou seja a superfície do furo e a superfície da cabeça do parafuso coincidem. (Alma Bolt Company & Prime Fasteners, 2006)

Para cabeças ovais é usada a técnica de *countersinking*, que se serve de um escareador, para adequar o furo à forma do parafuso, para encaixar o parafuso na sua totalidade no furo, representada na Figura 2.16.

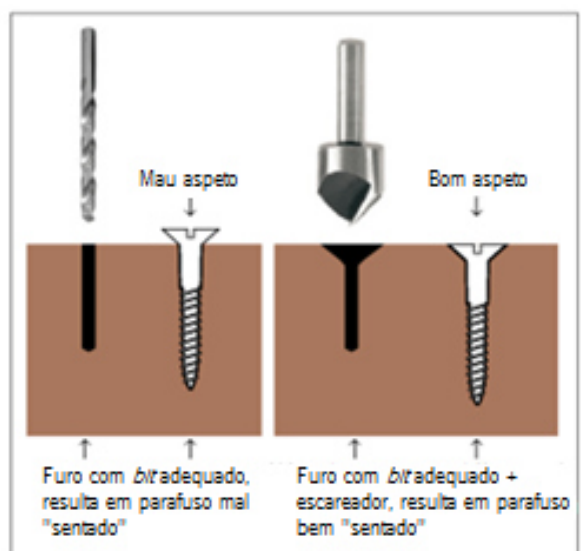


Figura 2.16 Processo de *countersinking* (Silverfish Longboarding, 2013)

Visto que o uso dos *machine screws* é muito limitado na empresa, correspondendo a 20% da sua totalidade e sendo apenas usados em furos roscados de peças em alumínio, não houve grande interesse nem informação sobre as suas características específicas. Assim, apenas é relevante mostrar os tamanhos e tipo de acionamento usados, representados na Tabela 2.6, para além de dizer que os furos são governados pelos *standards* industriais, tais como ISO, ASME, entre outros.

Tabela 2.6 Tipos de acionamento e tamanhos usados dos *machine screws*

| <i>Machine screws</i> usados na empresa | |
|---|---------|
| Acionamento | Tamanho |
| <i>TORX®</i> e <i>TORX PLUS®</i> | M2,M3 |

Os *machine screws* podem ser produzidos a partir de vários tipos de metais e plásticos, incluindo aço galvanizado, bronze, *nylon* (natural e preto), aço inoxidável 316, aço inoxidável 18-8, teflon, titânio e alumínio. (wiseGEEK, 2015); (Mutual Screw & Supply, 2015)

2.4.2.2 Parafusos autorroscantes

Um parafuso autorroscante tem características muito especiais e diferentes da maioria dos parafusos. Apresentam um *design* que lhes confere atributos perfurantes e/ou autorroscantes pelo que a peça não precisa de ser pré-furada, dentro de limites razoáveis de resistência do material e de comprimento do furo.

Para facilitar e melhorar a qualidade do processo, faz-se um furo piloto. Convém também saber que o *bit* usado para fazer este furo deverá ser ligeiramente inferior ao diâmetro do parafuso pois, caso contrário, as espiras do parafuso não vão ter material para se agarrarem, tornando impossível a penetração. Além disso, o furo piloto vai ajudar a garantir a perpendicularidade entre parafuso e peça, fazendo com que o parafuso entre na direção desejada. Caso isso não aconteça, poderá ocorrer a rotura da cabeça, destruição das espiras, entre muitos outros problemas.

As pontas destes parafusos podem ter duas formas principais: afiada ou romba. A primeira é mais indicada para materiais mais dúcteis como madeira e plástico, não havendo necessidade de furo piloto. A segunda possui a vantagem de reduzir a probabilidade de o parafuso ficar preso a meio do furo e, conseqüentemente “saltar” para fora do mesmo, sendo indicada para materiais metálicos mais resistentes. Contudo, a presença de furos piloto torna-se uma necessidade. (Bossard Proven Productivity, 2014)

Os parafusos autorroscantes vêm em duas formas: *thread-cutting* ou auto perfurantes, representados na Figura 2.17 e *thread-forming* ou autorroscantes, representados na Figura 2.18. Apesar de possuírem características diferentes ambos apresentam a capacidade de criar a sua própria rosca, facto que conduziu à definição do título desta secção. Assim, os *thread-cutting* são utilizados maioritariamente em madeira e metal e são desenhados para removerem material à medida que são roscados para dentro da peça, contudo produzem mais detritos do que os segundos.



Figura 2.17 Parafusos autorroscantes do tipo *thread-cutting* (Indiamart, 2015)

Os *thread-forming* são utilizados em plásticos, chapas de aço e alumínio, peças fundidas finas, entre outros e são desenhados para terem uma ligação mais apertada com a peça, formando apenas o furo adequado às suas espiras, tal como o nome indica. Todavia, há que ter o cuidado de não pôr demasiada tensão na junta, pois esse excesso poderá provocar a rotura da peça. Ambas as ações, *thread-forming* e *thread-cutting*, possuem binário suficiente para impedir que os parafusos “saltem” durante vibrações ou ciclos térmicos pelo que fornecem uma grande vantagem a estes parafusos.



Figura 2.18 Parafusos autorroscantes do tipo *thread-forming* (Shen Chou Fasteners Industrial, 2015)

Ambos apresentam uma desvantagem, o facto de os sulcos criados no furo “romperem” aquando da desmontagem. Posto isto, há duas soluções principais a executar, por um lado, pode-se colocar um novo parafuso autorroscante de diâmetro ligeiramente superior após cada desmontagem. Por outro lado, pode fazer-se uma inserção metálica que permite que o parafuso seja regularmente apertado e desapertado sem que ocorra desgaste das espiras, além de minimizar a tensão e expansão sentida pela peça.

Ao contrário dos *machine screws*, estes parafusos são altamente usados na empresa pelo que foi possível obter informação mais específica sobre as suas características. Realizaram-se, assim, duas tabelas, a Tabela 2.7, semelhante à que foi feita para os *machine screws* e a

Tabela 2.8, mais específica, referindo material e rosca usada. Para fornecer uma ideia mais visual, optou-se por mostrar o aspeto dos parafusos autorroscantes mais utilizados na empresa, representados na Figura 2.19. (wiseGEEK, 2015), (Bossard Proven Productivity, 2014)

Tabela 2.7 Tipos de acionamento e tamanhos usados nos parafusos autorroscantes

| Parafusos autorroscantes da empresa | |
|-------------------------------------|------------|
| Acionamento | Tamanho |
| <i>TORX®</i> e <i>TORX PLUS®</i> | M2,M2.5,M3 |

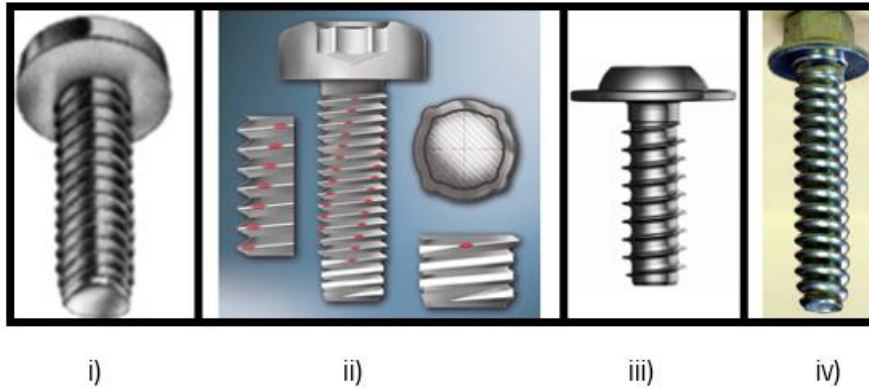


Figura 2.19 Parafusos autorroscantes usados i) *Taptite®* ii) *Spiralform* iii) *Delta PT®* iv) *Magtite®* (Delphi E&S, 2007)

Tabela 2.8 Características dos parafusos autorroscantes (Delphi E&S, 2007)

| Parafusos autorroscantes | | | |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Peças | Parafuso | Rosca | Certificação |
| Chapa de aço e alumínio fundido | <i>Taptite®</i> | Trilobular | <i>REMINC</i> |
| | <i>Spiralform</i> | Redonda e Espiral | <i>REMINC</i> |
| Peças plásticas | <i>PT®</i> | Redonda | <i>EJOT</i> |
| | <i>Delta PT®</i> | Redonda | <i>EJOT</i> |
| Peças em magnésio | <i>Magtite®</i> | Trilobular | <i>REMINC</i> |

Estes são os parafusos mais usados pela empresa para estabelecer ligações metálicas e plásticas. Como se verifica na

Tabela 2.8, parafusos usados para ligações com materiais diferentes apresentam tipos de rosca diferentes de forma a manterem a melhor *performance* possível. Tendo em conta a tabela apresentada, apenas revelou ser interessante explicar de forma sucinta os diferentes tipos de rosca usados. Assim, os *Taptite®* e os *Magtite®* serviam-se de uma rosca de forma trilobular (três

lóbulos), esta possui uma forma tal que permite reduzir a fricção durante a roscagem e fornece uma elevada fixação e resistência em caso de altas vibrações. (REMINC, 2005) Para os parafusos do tipo *PT®* e *Delta PT®*, a forma usada é a redonda, esta é ideal para plásticos, visto que, distribui igualmente o contacto superficial entre parafuso e junta, aumentando as cargas que podem ser aplicadas e reduzindo o aparecimento de pontos de maior tensão. (Stanley Engineered Fastening, 2015). Finalmente, tem-se os *Spiralform*, que apresentam uma forma redonda com quatro pequenos lóbulos, posicionados a 90° ao longo da rosca do parafuso, dando uma forma em espiral. Esta forma especial faz com que seja simples criar rosca na peça que está a ser aparafusada mas ao mesmo tempo garantir um ótimo contacto entre parafuso e peça. (EJOT, 2008)

Para concluir, e em termos gerais, os parafusos autorroscantes são usados essencialmente na carpintaria, indústria automóvel e aeroespacial, na construção de mesas metálicas e prateleiras e ainda na cirurgia. Muitos implantes dentários e próteses ortopédicas são exemplos do uso deste tipo de parafuso. (wiseGEEK, 2015)

2.5 “Dispositivos” e bases de aparafusamento

Na empresa, chamam-se “dispositivos” de trabalho a peças metálicas que têm como objetivo fixar em posição desejável a peça a aparafusar e guiar os parafusos para os respetivos furos.

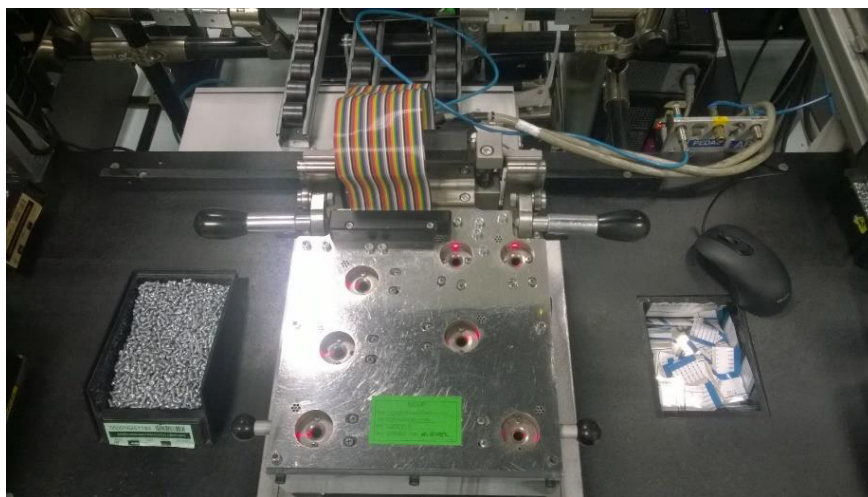


Figura 2.20 Vista de cima de um “dispositivo” de trabalho

Existem diversos “dispositivos”, com os mais variados *designs*, todavia como se observa nas Figura 2.20 e Figura 2.21, a ideia de um “dispositivo” é como a de uma “tostadeira”, abre-se,

coloca-se a peça a ligar, fecha-se e inicia-se o processo de aparafusamento. Desta forma, há duas garantias, a peça está na posição correta e os furos coincidem com os furos da peça.



Figura 2.21 Vista de frente de um “dispositivo” de trabalho

No entanto, há sempre espaço para erro, se o parafuso entrar inclinado no furo do “dispositivo” vai entrar inclinado na peça. Se, por outro lado, o “dispositivo” for de metal mais resistente que o *bit* da máquina de aparafusar, poderá haver um grande desgaste do *bit*. Outros casos poderão ainda acontecer, como por exemplo, o desgaste da rosca, desgaste da cabeça ou mesmo a rotura do parafuso por não haver concentricidade ou por uso negligente do operador.

Em suma, os “dispositivos” não resolvem a maior parte dos problemas, introduzindo mesmo outros problemas, pelo que na empresa são usados apenas em situações críticas.

As bases de trabalho são equipamentos bastante mais simples, apenas servem para acomodar as peças que estão a ser trabalhadas. Apresentam uma forma específica para posicionar corretamente as peças e facilitar o processo de aparafusamento e tal como nos “dispositivos” têm de apresentar tolerâncias detalhadas.



Figura 2.22 Base de aparafusamento

Caso não houvesse a presença destes equipamentos, representados na Figura 2.22, o processo de aparafusamento ocorreria diretamente na mesa o que seria menos rigoroso, pois não havia qualquer garantia que a peça estivesse sempre numa posição desejável. Finalmente, convém referir que estes equipamentos são feitos em materiais mais dúcteis, como polímeros, de forma a não danificar os produtos que estão a ser trabalhados.

2.6 Bancadas de aparafusamento

A bancada de aparafusamento, como o nome diz, é o local correspondente a um posto laboral, ocupado por um operador durante um turno de trabalho, apresentado na Figura 2.23. Na empresa, existem três turnos disponíveis, de manhã, de tarde e à noite, todos eles perfazem um máximo de 8 horas laborais, havendo sempre rotação de pessoal. A rotação dos postos é feita por razões ergonómicas, cansaço e monotonia principalmente e de forma a transmitir uma maior motivação aos operadores.



Figura 2.23 Posto individual de trabalho

A zona de trabalho é chamada de linha, como se vê na Figura 2.24, sendo composta por vários postos individuais, variando entre quatro a seis. Através de um estudo prático, baseado na observação das linhas e respetivos postos, fez-se um levantamento das condições oferecidas por estes. Assim, o posto é constituído por uma mesa comprida que serve simultaneamente para vários operários, uma cadeira individual de nível ajustável, um *ergo-arm* com uma máquina de aparafusar conectada, bases de aparafusamento, prateleiras com “dispositivos” e *bits* sobresselentes, necessários em caso de falha dos originais, de forma a nunca ocorrer a paragem do posto e, conseqüentemente, atraso de produção.



Figura 2.24 Linha de produção

2.7 Peças

Visto esta dissertação ser baseada no aparafusamento de autorrádios, apenas se vão discutir algumas peças que formam o “chassi” do mesmo, isto é, a “caixa” que o envolve. Desta forma, centrou-se este estudo em alguns aspetos principais da sua estrutura, como, a sua configuração, espessura média e nos materiais usados, dando-se uma ideia do tipo de peças que se aparafusava.

Com isto, foca-se em peças de chapa de aço e alumínio, de espessura muito fina entre 0.8 e 1.5 milímetros, como se pode observar na Figura 2.25.

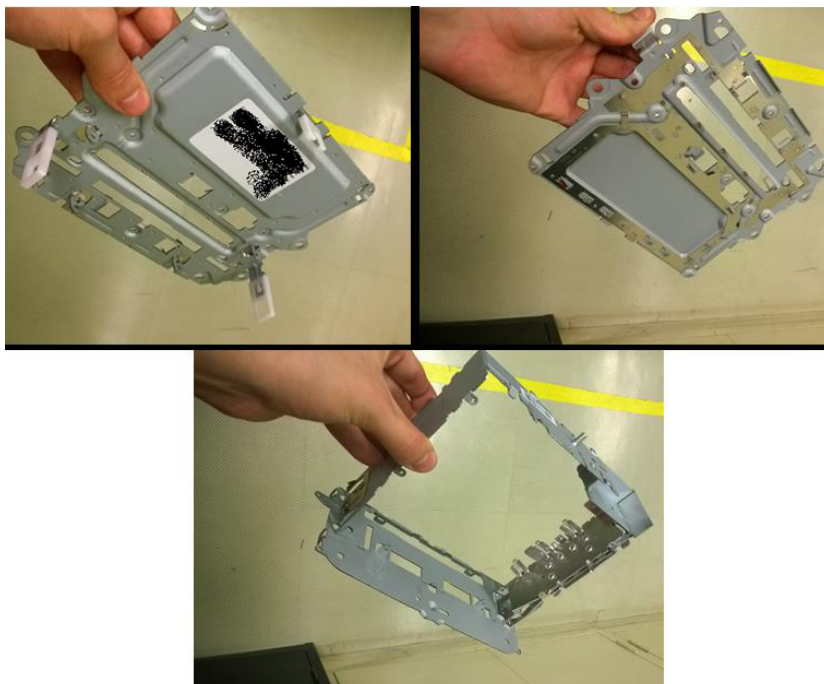


Figura 2.25 Peças metálicas

Como se verifica, estas peças apresentam configurações complexas, com diversas curvas e detalhes específicos. Os furos são, na sua maioria passantes, contudo e como se trata de peças de espessura reduzida, por vezes, é necessário haver furos extrudidos para compensar a falta de material.

Por outro lado, peças plásticas também são uma constante e tal como nas anteriores apresentam formatos complexos. Contudo, ao contrário das metálicas, os furos destas peças são cegos, como se pode verificar na Figura 2.26.



Figura 2.26 Peças plásticas

Para concluir, todas as peças trabalhadas na empresa apresentam configurações complexas e espessuras reduzidas pelo que o aspeto mais importante a ter em conta, aquando do aparafusamento, são as tolerâncias estabelecidas. Se algo for mal dimensionado, o aparafusamento vai ser defeituoso, por haver demasiado atrito entre parafuso e furo ou pela falta dele.

Capítulo 3 Considerações teóricas de aparafusamento

Neste capítulo será dada uma explicação de alguma teoria adjacente ao processo de aparafusamento. Iniciando por esclarecer o objetivo e fases do processo de aparafusamento, seguindo-se algumas considerações essenciais centradas tanto em parafuso, como junta e respetivo *design*.

Concluindo esta secção com estudos sobre as duas principais variáveis de aparafusamento, o binário aplicado no parafuso e o ângulo obtido após aperto e como estes parâmetros influenciam o aparafusamento.

3.1 Objetivo de aparafusamento

Para melhor compreensão do que se pretende com o aparafusamento, optou-se por começar este capítulo respondendo à questão: qual é o principal objetivo do aparafusamento?

- Encontrar o binário especificado?
- Maximizar o binário ao ligador?
- Minimizar o tempo de ciclo?
- Apertar dois componentes?
- Outros?

O principal objetivo do aparafusamento é o de atingir a carga de aperto desejada de forma a garantir que ambas as peças estabelecem uma ligação fidedigna e que esta se mantenha durante toda a vida expectável do produto. Este processo está representado na Figura 3.1.

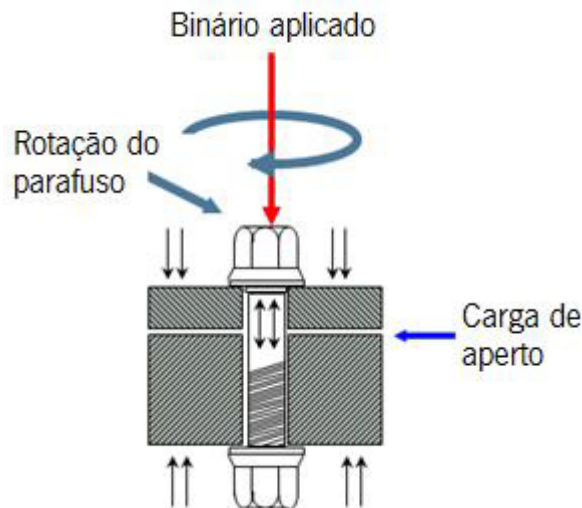


Figura 3.1 Processo de aperto de um parafuso (Delphi E&S, 2007)

Surge então outra questão: se o principal objetivo é o de atingir a carga de aperto desejável porque se mede o binário aplicado?

A melhor forma de verificar se a carga de aperto foi atingida é através da variação do comprimento do corpo do parafuso. No entanto, este é um processo impensável de executar, pois torna-se impraticável ou mesmo impossível de medir o comprimento do parafuso ao fim do aperto. Assim, usa-se o binário como substituto, além de que é muito mais fácil medir binário do que carga de aperto, através de medidores de binários analógicos ou digitais, como se pode verificar na Figura 3.2.



Figura 3.2 Medidor de binário analógico e digital (Allbiz, 2013); (PCE Instruments, 2015)

A carga de aperto desejável é conseguida através da imposição de um binário específico e existe uma relação direta entre carga de aperto e o binário aplicado para cada aplicação. (Atlas Copco, 2006), (Delphi E&S, 2008) Como há tantas variáveis envolvidas, é geralmente considerado

que para um determinado binário será criada uma carga com uma exatidão de mais ou menos 30%.

Através da análise, estudo e testes foi determinado que, em geral, qualquer parafuso segue a seguinte equação:

$$T = F_i \times K \times D \quad (3.1)$$

Com,

T = Binário F_i = Carga de aperto atingida

K = Fator de fricção D = Diâmetro nominal

De uma forma muito simplificada, K pode ser considerado uma combinação da fricção da rosca (K_1) e da fricção das superfícies dos rolamentos (K_2). Assim, $K = K_1 + K_2$, onde K é uma variável usada para correlacionar binário com carga de aperto.

- $K = 0.20$, para juntas com grandes níveis de fricção associadas a partes sem revestimentos específicos (banho de zinco, banho de estanho entre outros);
- $K = 0.15$, para parafusos revestidos e/ou para juntas com baixos níveis de fricção;
- Uma boa estimativa inicial é $K \approx 0.18$.

O fator de fricção consolida por isso todos os fatores que influenciam a carga de aperto, muitos dos quais dificilmente são quantificados sem experiências mecânicas. (Delphi E&S, 2007) Assim, realizam-se vários testes de binário a um parafuso e junta, enquanto se monitoriza e regista os respetivos valores numa tabela como representada na Figura 3.3.

| TABLE1. CLAMPING FORCES & APPLIED TORQUE-BOLTS AND NUTS (ISO METRIC FASTENERS) | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------|---------|---------|-------------------|------|------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | CLAMPING FORCE kN | | | | APPLIED TORQUE Nm | | | | | | | |
| | PROPERTY CLASS | | | | PC 8.8 / 8 | | PC 9.8 / 9 | | PC 10.9 / 10 | | PC 12.9 / 12 | |
| | 8.8/8 | 9.8/9 | 10.9/10 | 12.9/12 | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX |
| M3 | 2.2 | - | 3.1 | 3.7 | 1.1 | 1.6 | - | - | 1.4 | 2.2 | 1.7 | 2.6 |
| M4 | 3.8 | - | 5.5 | 6.4 | 2.5 | 3.7 | - | - | 3.7 | 5.3 | 4.0 | 5.7 |
| M5 | 6.2 | 6.9 | 8.9 | 10.4 | 5.0 | 7.4 | 5.6 | 8.2 | 7.2 | 10.6 | 8.0 | 11.6 |
| M6 | 8.7 | 9.8 | 12.5 | 14.6 | 8.4 | 12.4 | 9.5 | 14.0 | 12.1 | 17.8 | 13.5 | 19.5 |
| M8 | 15.9 | 17.8 | 22.8 | 26.6 | 20 | 30 | 23 | 34 | 29 | 43 | 33 | 47 |
| M10 | 25.3 | 28.3 | 36.1 | 42.2 | 41 | 60 | 36 | 68 | 59 | 85 | 65 | 94 |
| M12 | 36.7 | 41.1 | 52.5 | 61.4 | 71 | 105 | 80 | 118 | 102 | 150 | 114 | 164 |
| M14 | 50 | 56.1 | 71.6 | 84 | 112 | 168 | 127 | 187 | 161 | 240 | 182 | 265 |
| M16 | 68.2 | 76.5 | 97.5 | 114 | 175 | 260 | 198 | 292 | 250 | 371 | 282 | 406 |
| M18 | 86.2 | - | 119 | 140 | 255 | 372 | - | - | 353 | 513 | 390 | 560 |
| M20 | 110 | - | 152 | 178 | 355 | 520 | - | - | 491 | 718 | 550 | 796 |
| M22 | 136 | - | 189 | 220 | 500 | 705 | - | - | 675 | 989 | 750 | 1080 |
| M24 | 159 | - | 220 | 256 | 620 | 828 | - | - | 857 | 1283 | 950 | 1370 |

Figura 3.3 Relação entre binário e carga de aperto para diferentes parafusos (Anochrome Group, 2015)

De seguida, para um específico parafuso inserem-se os valores já conhecidos de binário, carga de aperto e diâmetro e descobre-se K . Muitos engenheiros usam um único valor de K para uma série de diâmetros e geometrias de parafusos.

Em suma, o fator de fricção é um fator de correção, não derivado de princípios de engenharia mas de técnicas experimentais, tornando a equação válida. (Machine Design, 2009)

Além disto, existem diferentes fatores que intervêm na relação entre binário e pré-carga. Durante o aparafusamento nem todo o binário aplicado é transferido para a carga de aperto, aliás apenas uma pequena parte deste o faz, como se pode observar na Figura 3.4.



Figura 3.4 Fatores que intervêm na relação entre binário e pré-carga, em forma de gráfico e em representação real (Delphi E&S, 2005)

Como se observa, cerca de 90% do binário aplicado, é usado para combater o atrito entre as superfícies das peças a ligar sobrando apenas 10% para ser convertido em carga de aperto útil. Isto acontece por várias razões, algumas estão apresentadas nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2

Tabela 3.1 Fatores que influenciam a fricção durante o processo de aparafusamento (parte 1)

| <u>Fatores que influenciam a fricção durante o processo de aparafusamento</u> |
|---|
| O acabamento da superfície das peças a ligar |
| Tipos de materiais (alumínio, plástico...) |
| Alinhamento do parafuso com o respetivo furo e respetivas folgas |
| Espessura da peça e tipo de galvanização (se galvanizado) |
| Tipo de parafuso (autorroscante, <i>machine screw</i>) |
| Uso de lubrificante, a sua quantidade e sua qualidade |

Tabela 3.2 Fatores que influenciam a fricção durante o processo de aparafusamento (parte 2)

| Fatores que influenciam a fricção durante o processo de aparafusamento |
|--|
| A velocidade de condução do parafuso durante o aperto |
| Forma do encaixe entre as espiras |
| Pressões na superfície |
| Presença de outros materiais na junta: anilhas, porcas, entre outros |
| Tolerância de empilhamento de peças |

Deste modo, a relação entre o binário de aperto e a carga de aperto desejável não é tão simples de adquirir, tendo sempre de haver um estudo rigoroso de todas as condições da junta e respetivo ligador, tornando possível adequar o binário a uma carga desejável. (Delphi E&S, 2008)

3.2 Fases de aparafusamento

Como foi referenciado no início desta dissertação, um processo de aperto de um parafuso parece simples à primeira vista, todavia é um pouco mais complexo do que parece. Assim, como se pode observar na Figura 3.5, existem quatro fases de aperto. A primeira fase é caracterizada por ainda não haver contacto entre a cabeça do parafuso e peça, no entanto, o seu corpo já se encontra embutido. A segunda fase termina quando a cabeça do parafuso encosta na superfície da peça (parafuso “sentado”). Posto isto, atingem-se a terceira e quarta fases, onde se dão as deformações elásticas e plásticas, respetivamente.

Para melhor compreensão destas fases finais ou até do processo inteiro, pensa-se numa mola. Desta forma, pensa-se na fase 3 como numa mola comprimida, gerada pelas forças de compressão que o parafuso exerce sob as peças, ocorrendo apenas deformação elástica no mesmo, causada pelas forças de direção oposta geradas pelas peças. De seguida, na fase 4, ocorre a “expansão da mola”, ou seja as forças que anteriormente apenas causaram deformação

elástica no parafuso, geram agora deformação plástica no mesmo, alterando ligeiramente a sua forma, como se observa na Figura 3.5. (Atlas Copco, 2006); (Delphi E&S, 2008)

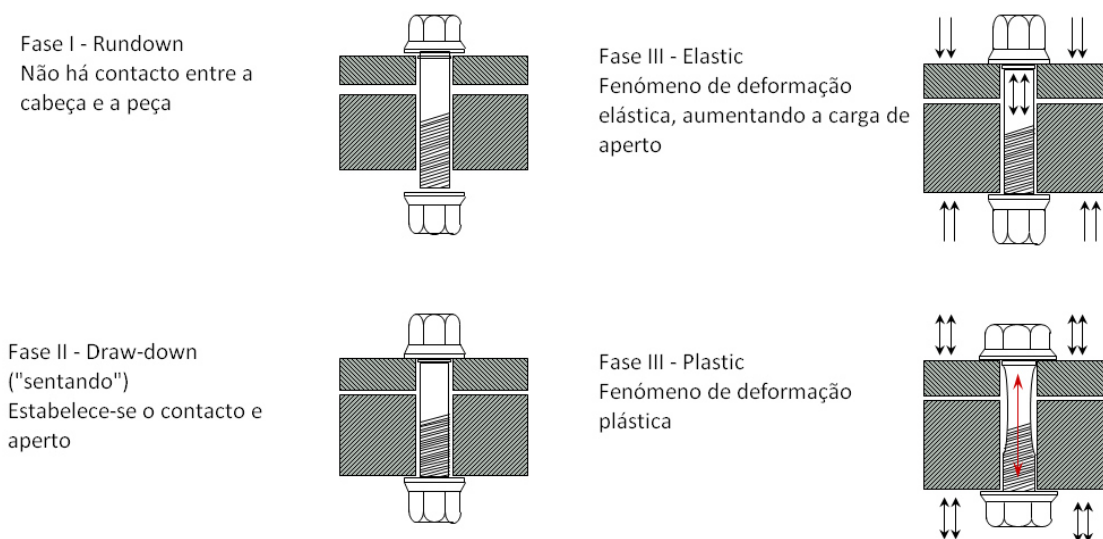


Figura 3.5 Quatro fases de aparafusamento (Atlas Copco, 2006)

3.3 Encaixe entre parafuso e furo

Para um parafuso que é conduzido dentro de um furo roscado ou dentro de uma porca, é sabido que o encaixe "total" das espiras do parafuso com os vales do furo é automaticamente garantido. Isto acontece porque o furo é feito para assegurar o encaixe com as espiras de um específico parafuso, como se vê na Figura 3.6. Este contacto fornece muito pouco ou nenhum binário prevalecente e, por isso, resulta num aperto muito limitado. Define-se binário prevalecente como o que é necessário ter para fazer rodar um parafuso antes de ele se "sentar" no respetivo furo. Nenhuma parte do binário prevalecente é transmitida para o aperto final e com isso para a carga de aperto desejável. Desta forma, é muito mais fácil de um *machine screw* "fugir" durante o aperto quando as forças de afastamento causadas por vibração ou quando as diferenças entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais a ligar são demasiado grandes. (Delphi E&S, 2007), (Atlas Copco, 2006)

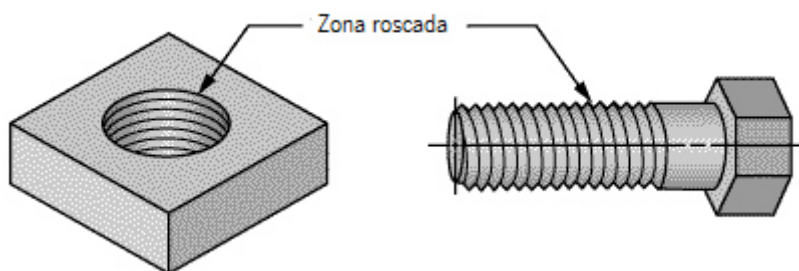


Figura 3.6 Espiras de um *machine screw* e respetivo furo roscado (Atlas Copco, 2006)

Não obstante, nos parafusos autorroscantes, as cristas das espiras da parte roscada comprimem e penetram nas superfícies das paredes da peça. Este fenómeno fornece um mecanismo físico de perfuração que, por sua vez, cria o binário prevalectente, tornando estes parafusos menos suscetíveis de “saltar” do furo aquando do processo de aperto.

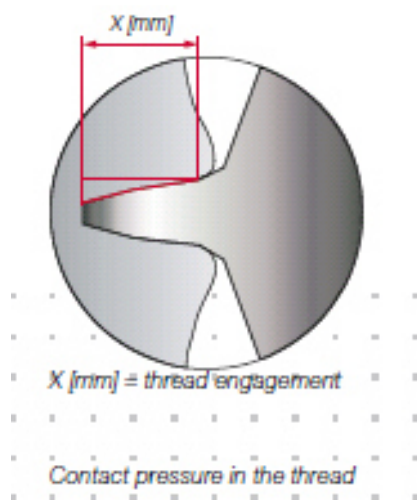


Figura 3.7 Penetração das espiras dos parafusos autorroscantes (Delphi E&S, 2007)

Como se observa na Figura 3.7, o fenómeno de encaixe entre as espiras do parafuso autorroscante e o furo não é total, pelo que se introduzem novos conceitos. Começa-se por *thread depth engagement*, que representa a percentagem de encaixe entre as espiras completas do parafuso e os sulcos formados, à medida que o parafuso é conduzido para o furo, representado na Figura 3.8.

O *thread depth engagement* determina tanto o binário necessário para criar os sulcos ao longo do furo como a respetiva carga de aperto. Uma percentagem baixa desta variável faz com que seja fácil conduzir o parafuso para dentro do furo mas não haverá tanta carga de aperto pelo que poderá ser mais fácil romper o seu corpo e a sua cabeça. Por outro lado, uma elevada percentagem de profundidade de encaixe entre espiras poderá dificultar a condução do parafuso até estar completamente sentado mas terá, sem dúvida, uma maior carga de aperto.



Figura 3.8 Profundidade e comprimento de encaixe de espiras (Delphi E&S, 2011)

O *thread length engagement* é uma “chave” essencial para o *design* de uma junta. Esta variável, representa o comprimento da parte roscada que está encaixada no respetivo furo, como se vê na Figura 3.8. Um aumento no *thread length engagement* traduz-se num aumento linear do comprimento de contacto da zona roscada. (Delphi E&S, 2011); (Brutchen, 2005)

Para concluir, quanto maior for o valor destas variáveis maior será o contacto estabelecido entre parafuso e peça e, desta forma, maior vai ser a qualidade da ligação.

3.4 Tamanho do Parafuso

A partir do momento em que a profundidade e o comprimento da secção de encaixe entre as espiras do parafuso e a superfície do furo (*thread depth engagement* e *thread length engagement*) são percebidas, como representadas na Figura 3.8, o tamanho do parafuso é determinado. O tamanho do parafuso (M2, M2.5...) vai determinar a força de tensão que o parafuso possui. Se o *design* da junta requer uma carga de aperto elevada, então, o tamanho do parafuso tem que ser igualmente elevado, para suportar tanto o elevado binário aplicado como a grande tensão, imposta dentro da junta, necessária para garantir a carga de aperto. Por outro lado, parafusos de diâmetro largo, aumentam a profundidade do encaixe das espiras no furo, o que proporciona um maior contacto e maior aperto.

Segue-se uma breve explicação:

um parafuso autorroscante do tipo *thread-forming* M2.5x0.45 tem um diâmetro (D) de 2.5mm e por isso um perímetro de circunferência de espira de 7.854 milímetros, como se verifica na fórmula (3.2).

$$\pi \times D = \pi \times 2.5 = 7.854 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Se o parafuso tivesse três espiras (n) completas de comprimento de encaixe (*thread length engagement*), o perímetro total da circunferência das espiras embutidas no furo seria de 23.56 milímetros, como apresentado na fórmula (3.3).

$$7.854 \times n = 23.56 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Considera-se agora outro exemplo, um parafuso M3x0.5, o qual tem um diâmetro de 3 milímetros e, para três espiras de *length engagement* um perímetro de circunferência total de 28.27 milímetros, como apresentado na fórmula (3.4).

$$\pi \times D \times n = 28.27 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Assim, o parafuso M3 para uma junta que requer 85% de *thread depth engagement* teria proporcionalmente uma carga de aperto 17% maior do que para o M2.5. Ou seja, visto que o perímetro total de espiras embutidas para M3 é 4.71 milímetros maior do que para M2, então, está-se na presença de um acréscimo de 17%, o qual irá transmitir-se em um igual acréscimo na carga de aperto. Aumentando o tamanho do parafuso, aumentará a carga de aperto mas apenas se a aplicação necessitar de uma carga tão elevada, caso contrário um tamanho mais pequeno servirá satisfatoriamente. A regra é que para uma placa metálica fina o número mínimo de espiras embutidas é de três, considerando $\pi = 3.1416$. (Delphi E&S, 2011)

Porquê três espiras completas? Usando o mesmo exemplo, o parafuso M3x0.5 para uma junta que requer 85% de *depth engagement*, irá ter um rácio de acréscimo 3:1 na carga de aperto, se for apenas baseado no embutimento de três espiras ao invés de uma. Similarmente, o parafuso é mais provável de moer (*stripped screw*) com apenas uma espira, em termos de comprimento de encaixe (*thread length engagement*), em relação às três espiras preferidas.

A formação de rosca no furo (*thread forming*) é um passo que tem que ser executado com muito cuidado. A percentagem de *thread depth engagement* e *thread length engagement* são elementos independentes de qualquer *design* de uma junta. Tentar compensar um pelo outro introduz riscos no *design* da junta pelo que deve de ser evitado.

Assim, existem outros elementos que ajudam neste processo: fazer tratamentos térmicos nos parafusos para aumentar a rigidez e dureza da superfície das suas espiras, especificar a cera usada nas superfícies das espiras. Existem ainda outras ações, tais como: especificar o correto tamanho do furo e respetiva tolerância, arranjar forma de parar a máquina de aparafusar quando o binário alvo é atingido, reduzindo o *overshooting*, garantir o alinhamento entre peças, usar um *ergo-arm* para ajudar a garantir a perpendicularidade entre peça e máquina, definir o correto binário de encosto, entre outros. (Delphi E&S, 2011)

3.5 Tamanho do Furo

O furo, representado na Figura 3.9, através do qual o parafuso vai atravessar é um elemento crítico para a definição da geometria da junta.

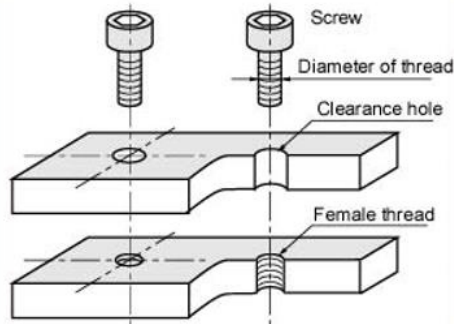


Figura 3.9 Furo (National Maritime Research Institute, 2003)

Um furo muito largo irá resultar numa área de contacto muito estreita entre a cabeça do parafuso e a superfície da peça e, por isso, tornará difícil o processo de aperto. Se o furo for mais largo do que o parafuso, o problema vai ser maior, pois a cabeça do parafuso irá ficar embutida no furo, deixando de ter o efeito de “paragem” das peças. O que acontece numa ligação destas é que as peças fazem pressão no parafuso para se afastarem e a cabeça tem o objetivo de estabelecer o contacto na superfície e garantir uma paragem mecânica para este fenómeno. Assim, teria de usar-se um parafuso com cabeça do tipo de anilha como na Figura 3.10, ou então, servir-se de um conjunto parafuso e anilha, desta forma resolvia-se o problema de contacto.



Figura 3.10 Parafuso com cabeça do tipo de anilha (Melfast, 2014)

Se, por outro lado, o furo for demasiado estreito, outros problemas poderão surgir, tais como de alinhamento, nomeadamente, com as tolerâncias de empilhamento das peças a ligar, criando um maior atrito e com isso um maior desperdício do binário aplicado.

Além disto, a lubrificação das superfícies das peças a serem apertadas é um outro fator crítico, sendo que a maior parte do binário de encosto é dissipado para superar o atrito. Alterações significativas na lubrificação implicam uma geometria de junta diferente e podem também afetar o perfil do estudo de binário à medida que a cabeça dos parafusos contactam com as superfícies das peças. Desta forma, poderá ser necessário promover um estudo de binário a cada geometria de junta para verificar se, aquele binário, pode ser aplicado numa outra junta de *design* similar mas com lubrificação diferente.

Sempre que possível, o mesmo diâmetro de furo deve ser adotado para um parafuso específico. Os furos também devem ter em conta o valor do raio de filete, raio correspondente à zona de ligação entre a cabeça do parafuso e respetiva haste, mais apropriado para o tamanho do parafuso.

Diferentes tamanhos de furos implicam um *design* de junta diferente e também podem afetar o perfil do estudo de binário à medida que a cabeça do parafuso contacta a superfície da peça. Assim, um estudo de binário é dedicado a um *design* da junta para verificar se aquele binário de encosto pode ser aplicado numa junta similar mas com um furo diferente.

A Figura 3.11 representa os furos *standard* para determinados parafusos, sendo regulados pela ASME B18.2.8 (ISO 273). (Delphi E&S, 2011)

| Screw Size | Minimum Hole Diameter (mm) | Maximum Hole Diameter (mm) |
|------------|----------------------------|----------------------------|
| M2 | 2.40 | 2.54 |
| M2.5 | 2.90 | 3.04 |
| M3 | 3.40 | 3.58 |
| M3.5 | 3.90 | 4.08 |
| M4 | 4.50 | 4.68 |
| M5 | 5.50 | 5.69 |
| M6 | 6.6 | 6.82 |
| M8 | 9.00 | 9.22 |
| M10 | 11.00 | 11.27 |
| M12 | 13.5 | 13.77 |

Figura 3.11 Diâmetro mínimo e máximo do furo para diferentes tamanhos de parafusos (National Maritime Research Institute, 2003)

3.6 Tipos de juntas, *Hard Joint* e *Soft Joint*

Os termos *soft joint* e *hard joint* são utilizados por quem trabalha com parafusos ou outros tipos de ligadores mecânicos, pelo que o seu conhecimento não é algo banal.

Deste modo, será feita uma distinção dos dois tipos de juntas e, seguidamente, será explicada a diferença entre ambas, no processo de aparafusamento.

3.6.1 Hard Joint

Inicialmente, tem de ser feita uma introdução ao termo “ângulo” como parte principal do processo de aperto dos parafusos. À medida que o parafuso é conduzido, vai rodando em torno do seu eixo central e avançando linearmente para o respetivo furo.

A definição de *hard joint* em contraste com *soft joint* é então dada pelo deslocamento angular, ou seja, pela quantidade de voltas que cada parafuso perfaz, desde estar “sentado” até estar corretamente apertado. Assim, e em termos angulares, *hard joint*, representada na Figura 3.12, é uma junta onde o parafuso requer menos de 30° até atingir a carga de aperto desejada. (Atlas Copco, 2007)

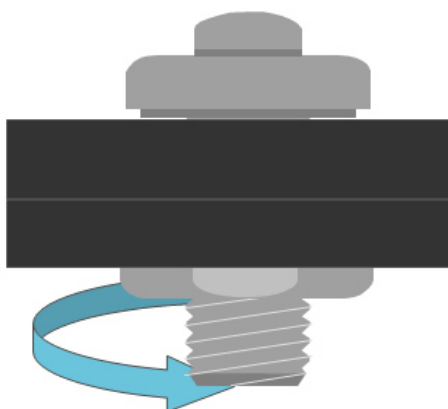


Figura 3.12 Junta do tipo *hard joint* (Atlas Copco, 2007)

Não obstante, também se define como uma junta onde os coeficientes de expansão térmica (*CTE* 's) das peças a juntar são baixos e o relaxamento da junta não é um problema. Um parafuso dentro de uma *hard joint* poderá reter uma carga de aperto suficiente mesmo em situações de alguma temperatura e vibração. Uma *hard joint* define, tipicamente, todas as juntas metálicas. (Delphi E&S, 2008); (Atlas Copco, 2007)

3.6.2 Soft joint

A definição de *soft joint* é, tal como a de *hard joint*, dependente do percurso angular que o parafuso efetua até atingir a carga de aperto. Assim, define-se *soft joint*, representada na Figura 3.13, como uma junta onde o parafuso necessita mais de 720°, duas voltas completas, até atingir a carga de aperto desejada. (Delphi E&S, 2007)

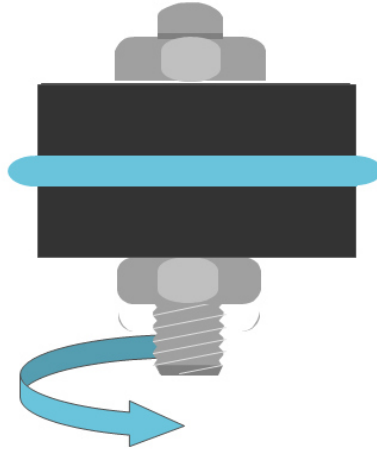


Figura 3.13 Junta do tipo *soft joint* (Atlas Copco, 2007)

Para além disso, define-se como uma junta onde um dos materiais a ligar é muito provável de relaxar, ou seja, de ceder sob aperto. Posto isto, todos os ligadores mecânicos usados em *soft joints* requerem um mecanismo de aperto secundário para prevenir o facto de o parafuso sair da ligação devido à redução da carga de aperto. Como se observa na Figura 3.14, várias são as possibilidades a usar, tais como: porcas, parafusos e anilhas em formato de serra, colas para aperto, entre outros. Apesar de haver inúmeras hipóteses para evitar este fenómeno, geralmente opta-se por uma solução mais simples, os parafusos autorroscantes. (Delphi E&S, 2007)



Figura 3.14 Alguns mecanismos secundários de aperto (Bollhoff, 2013)

Em síntese, todas as juntas que ligam materiais dúcteis, como os plásticos, devem ser tratadas como *soft joints*. (Delphi E&S, 2008); (Atlas Copco, 2007)

3.6.3 Comparação visual

Após se terem definido os dois tipos de juntas, segue-se uma comparação mais visual do impacto do processo de aperto final, apresentada na Figura 3.15.

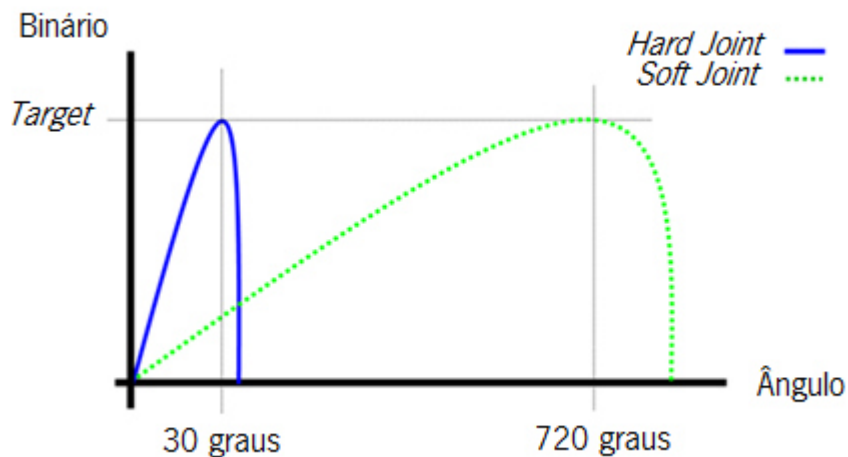


Figura 3.15 Aperto numa *hard joint* e *soft joint* (Delphi E&S, 2008)

As duas curvas mostram que para atingir o mesmo binário, os ângulos de rotação são bastante diferentes:

- O parafuso correspondente à *hard joint* pouco gira entre a fase “sentada” e o aperto;
- O parafuso correspondente à *soft joint* tem de girar consideravelmente até atingir a carga de aperto desejável.

Esta discrepância resulta em tempos diferentes para atingir o binário desejado. Numa *hard joint*, esse processo é quase imediato, ao contrário do que se passa numa *soft joint*. (Delphi E&S, 2008)

3.6.4 Relaxamento da junta

Ao falar dos conceitos de *soft* e *hard joint* introduziu-se um novo termo, relaxamento da junta, cuja representação está exibida na Figura 3.16, focando todo o processo ao longo do tempo.

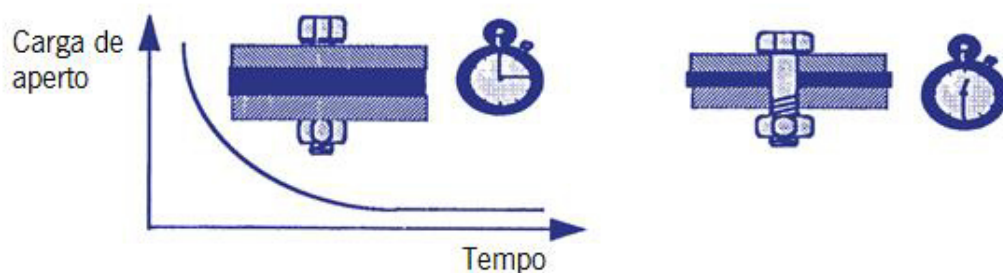


Figura 3.16 Processo de relaxamento de junta (Mountz, 2015)

Como se verifica na Figura 3.16, é estabelecida a ligação e atingida a carga de aperto desejada, no entanto, à medida que o tempo vai passando, a junta vai relaxando e a carga de aperto diminuindo, tornando a junta cada vez menos fiável. Assim, de um modo geral:

- O relaxamento ocorre até um certo ponto em todas as juntas, após um determinado período de tempo;
- O relaxamento da junta é causado pelas superfícies das peças a ligar embutidas ou pelas partes mais dúcteis;
- Numa *hard joint*, 70%-90% do relaxamento ocorre entre os primeiros 10 a 50 milissegundos. (Atlas Copco, 2006), (Atlas Copco, 2007)

3.6.4.1 Soluções para o relaxamento da junta

Visto o relaxamento de juntas ser algo que não pode ser evitado, indagaram-se formas de resolver ou atenuar este processo, apresentadas nas Tabela 3.3 e **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Tabela 3.3 Soluções para o relaxamento da junta (parte 1) (Mountz, 2015)

| Soluções para relaxamento da junta | |
|------------------------------------|--|
| Solução 1 | Realizar o aperto, desapertar o parafuso e, finalmente, voltar a apertar |
| Solução 2 | Redesenhar a junta, substituindo peças mais dúcteis por compostos vedantes |
| Solução 3 | Aplicar binário no parafuso, esperar brevemente e, de seguida, continuar o aperto (pode ser repetido várias vezes) |

Tabela 3.4 Soluções para o relaxamento da junta (parte 2) (Mountz, 2015)

| | |
|-----------|---|
| Solução 4 | Usar uma máquina de aparafusar com baixa velocidade quando se estiver a aplicar o binário de aperto final |
|-----------|---|

Estas são algumas das soluções usadas atualmente. Todavia, na empresa, todas as máquinas de aparafusar apresentam programas específicos com diferentes velocidades de “encosto” ou *rundown* e de aperto final, mantendo valores diferentes para casos diferentes. Deste modo, as máquinas possuem elevada velocidade de encosto, velocidade usada para encostar o parafuso na peça, isto é feito de forma a obter uma elevada cadência de trabalho. No entanto, quando se pretende atingir o binário de aperto, a velocidade reduz drasticamente, evitando cargas exageradas e relaxamentos elevados.

3.7 Estudo das variáveis de aparafusamento

Nesta secção vai ser realizada uma definição dos estudos que condicionam um processo de aparafusamento. Como foi indicado ao longo desta dissertação, dois dos principais parâmetros de aperto são o binário aplicado ao parafuso e a velocidade de rotação, no entanto, existe um outro, igualmente importante, o ângulo total que o parafuso efetuou até estar corretamente apertado. Assim, será feita uma explicação de como estes parâmetros, binário e ângulo, contribuem para um bom processo de aparafusamento.

Inicialmente, e para se fazer o enquadramento desta secção, será dada uma distinção entre os dois tipos de binário, binário dinâmico e binário estático. Seguidamente, realizar-se-ão os processos de análise e contagem, começando pelos estudos de binário e terminando na monitorização angular.

3.7.1 Binário dinâmico e binário estático

Binário de aperto, binário alvo ou binário de condução são alguns nomes que definem esta grandeza. O binário dinâmico é aquele que é aplicado durante o aperto e, por isso, garante a carga de aperto desejável. É medido, enquanto o *bit* roda o parafuso no respetivo furo e/ou apenas quando o parafuso para sob aperto, recorrendo-se a um transdutor e um dispositivo de monitorização elétrica, presente nas máquinas de aparafusar (Figura 2.2). Esta é a forma de medição mais precisa do binário aplicado no parafuso.

Binário estático é definido como o binário necessário para mover o parafuso a partir de uma posição estática ou estacionária na direção de aperto. É usado para determinar o binário mínimo,

que foi aplicado na junta, e é medido ao fim do aperto ter sido executado. Para tal, é normalmente adquirido através de uma chave manual ou digital de medição de binário, como representadas na Figura 3.2.

Em termos das medições de binário dinâmico e estático, os resultados são geralmente diferentes devido a fatores como:

- Fricção, coeficiente de fricção estático é diferente do dinâmico;
- Relaxamento da junta;
- Adesivos ou outros mecanismos de aperto secundário.

Surge então a questão, qual dos dois será maior, binário residual ou dinâmico? A resposta oscilará, se se tratar de uma junta normal, sem grande relaxamento, o binário estático é normalmente maior devido à física imposta e à diferença entre fricção estática e dinâmica. Se, por outro lado, a junta relaxar severamente, o binário dinâmico será maior. (Atlas Copco, 2006), (Delphi E&S, 2008), (Atlas Copco, 2007)

3.7.2 Estudo de binário

A especificação do binário de aperto para uma junta particular é um processo absolutamente crítico, que deve estar sempre associada a uma tolerância apropriada. O objetivo deste estudo é garantir que o *design* da junta seja robusto e forneça dados para especificar o binário de aperto mais correto. Para além disto, este estudo quantifica onde o parafuso “senta” e onde falha. No entanto, para que este estudo se desenvolva corretamente é essencial que a geometria da junta seja bem dimensionada e que o parafuso seja o mais adequado para a aplicação em questão. Muitas vezes há tendência para reutilizar um *design* anterior, onde existem diferenças ao nível de:

- Tipo de material;
- Espessura do material;
- Materiais adicionais: anilhas, porcas, *busbar* (barra metálica responsável por conter componentes eletrónicos e por conduzir corrente elétrica), entre outros.

Desta forma, urge o cuidado a ter com esta reutilização do conjunto, junta e ligador, especialmente quando se assume que pode reutilizar-se o binário anterior também. Finalmente, têm de tomar-se em conta algumas considerações críticas para um bom estudo de binário, que incluem algumas ponderações, que se passa a mencionar:

- Garantir que existe nas peças uma representação das suas tolerâncias bem como todas as variações possíveis de *design*,
- Um mínimo de 30 *rundowns* é necessário para que a amostra seja estatisticamente significativa:
 - A velocidade de condução deve estar compreendida entre 200-300 rpm (A não ser que se conheça a velocidade de condução de produção e que essa seja próxima da janela anterior).
- Nenhum parafuso ou peça deverão ser reutilizados durante este estudo;
- Visto que a sequência de aparafusamento poderá afetar os resultados, deve-se usar a mesma sequência usada na linha de produção.

O engenheiro mecânico do produto e a equipa de engenharia de *design* são os responsáveis por executar e vigiar este estudo, de forma a estabelecer os requisitos de binário para cada produto. Juntando e analisando todos os dados numa amostra estatisticamente significativa, onde se realizam vários apertos, deverá ser suficiente para os engenheiros conseguirem:

- Verificar que a ligação é robusta;
- Estabelecer o binário adequado com as tolerâncias corretas.

Finalmente, e obtendo os resultados deste estudo, o principal objetivo é a obtenção de uma grande janela de valores, que separa o “binário de encosto” e o “binário de falha”, de forma a facilitar ao setor de produção a execução de aparafusamentos eficazes e rápidos.

De seguida, é apresentado um gráfico que compara duas curvas de aperto de um parafuso autorroscante num furo passante (recordar Figura 2.10), que ilustram uma variação em 30 *rundowns* de amostragem, tendo assim uma curva de binário máximo e uma de binário mínimo.

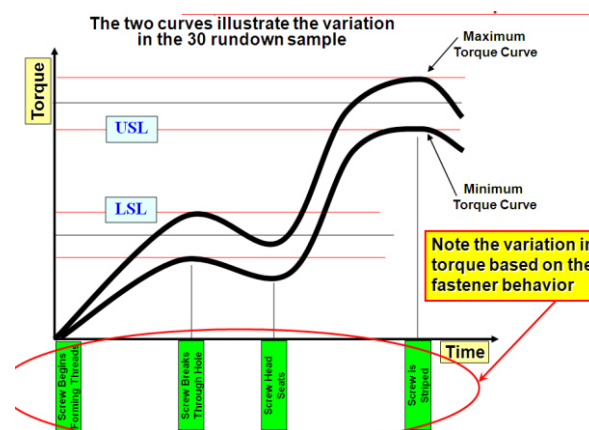


Figura 3.17 Duas curvas que ilustram a variação de 30 rundowns num furo aberto (Delphi E&S, 2008)

Analisando o gráfico da Figura 3.17, observa-se que o binário aumenta desde o parafuso começar a abrir rosca até ao momento em que atravessa o furo, correspondendo ao primeiro pico da curva. A partir daí, e visto não haver grandes obstáculos face ao avanço do parafuso, o atrito é menor e com isto o binário reduz ligeiramente até ao parafuso sentar-se no respetivo furo, correspondendo ao primeiro vale da curva. Deste momento em diante o binário sobe abruptamente, pois é neste intervalo de tempo que se consolida o aperto em si.

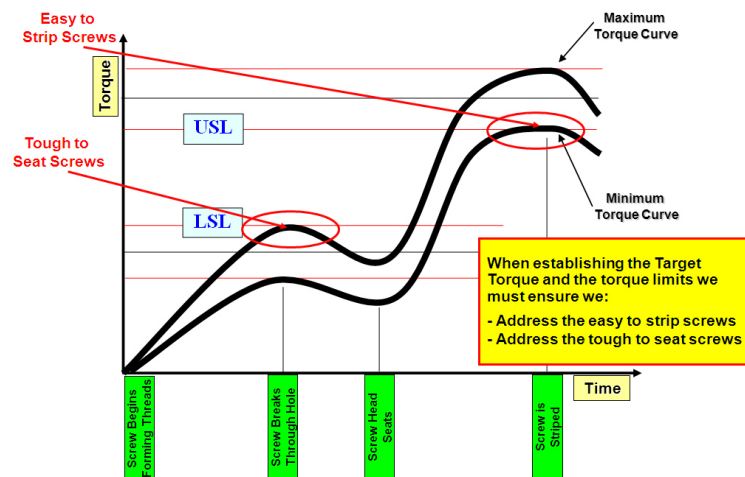


Figura 3.18 Representação dos momentos de sentar e romper parafusos respetivamente (Delphi E&S, 2008)

Observando o gráfico da Figura 3.18, apercebe-se que para estabelecer o binário alvo e respetivos limites é necessário ter atenção a:

- Momento onde é fácil romper a cabeça dos parafusos;
- Momento onde é difícil “sentar” os parafusos.

Desta forma, os limites de binário vão estar sempre contidos entre estes parâmetros, garantindo que, por um lado, o parafuso vai-se “sentar” no respetivo furo mas não vai romper por binário excessivo.

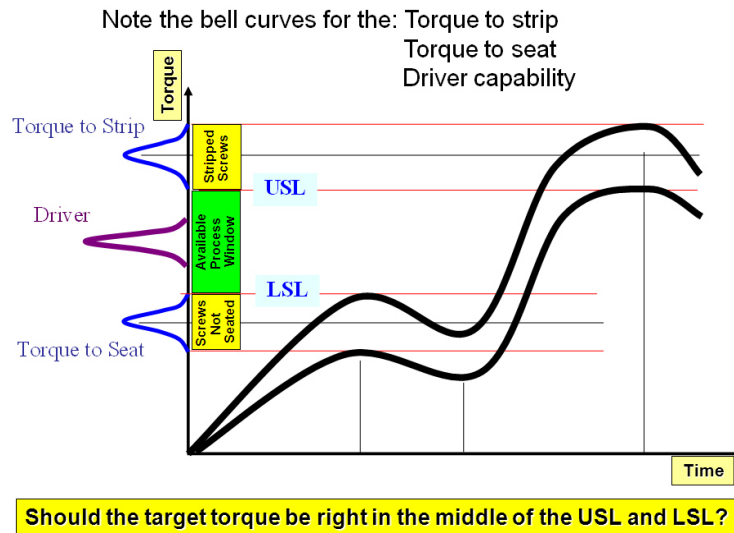


Figura 3.19 Representação da janela de binário (Delphi E&S, 2008)

Porém, como se verifica na Figura 3.19, mesmo que a janela USL e LSL fosse usada como tolerâncias específicas de binário, só por si, não dava uma garantia de 100% de fiabilidade de junta. Isto porque existem outras variáveis a considerar, tais como:

- Calibração e capacidade da máquina de aparafusar (capacidade da máquina realizar aparafusamentos com precisão suficiente);
- *Overshoot* - aumento do binário que ocorre durante aquele tempo gasto até a máquina de aparafusar parar;
- Aptidão para detetar um e outros defeitos.

Assim, não há interesse nem em usar a janela de processo inteira nem em centrar o binário alvo para acomodar estas influências adicionais. Quando o objetivo é o de “sentar” o parafuso e de não correr o risco de haver desgaste, ou seja, de ultrapassar uma determinada carga de aperto, existe uma regra industrial, que segue os seguintes passos:

1. Divide-se a janela de processo ($LSL-USL$) em 3 partes;
2. Estabelece-se o binário alvo (*target torque*) exatamente $\frac{1}{3}$ abaixo do limite de especificação superior (USL) e $\frac{2}{3}$ acima do limite de especificação inferior (LSL);
3. Calculam-se as tolerâncias de binário e garante-se que a capacidade da máquina é igual ou superior a 2.0.

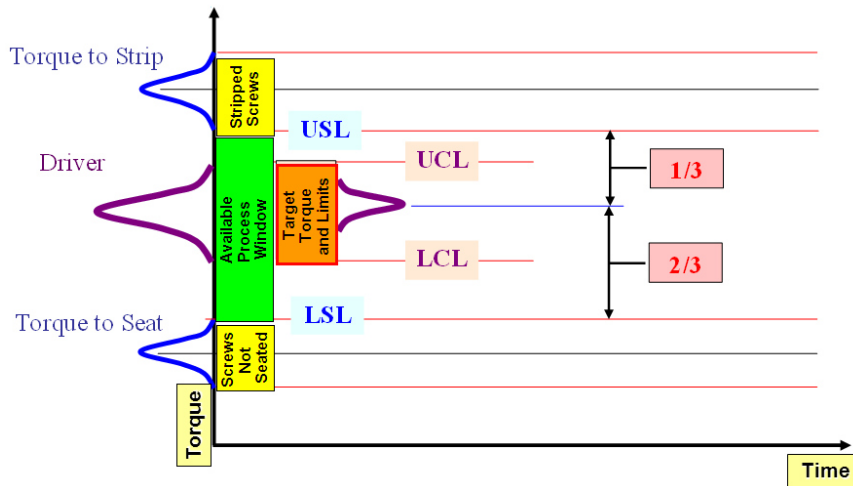


Figura 3.20 Estabelecer a regra do polegar (Delphi E&S, 2008)

Como se observa na Figura 3.20, o binário dinâmico não é centrado entre o *seating torque* e o *torque to strip*, zonas onde o parafuso se senta e onde o mesmo começa a moer, pelo que esta regra deve ser adotada sempre que se pretendem descobrir os limites de binário para uma junta específica. Além disso, esta regra industrial é baseada em determinadas considerações:

- É muito mais complexo detetar um parafuso ligeiramente mal “sentado” do que um parafuso moído, isto porque o primeiro respeita as janelas de binário e ângulo e o segundo não;
- Se o processo de condução do parafuso fugir fora de controlo não se pretende que o binário tenha valores perto do binário de encosto, resultando em juntas marginais não detetáveis;
- Para garantir a fiabilidade de uma junta ao longo do tempo, o parafuso deve estar completamente sentado e completamente apertado.

Através deste processo e seguindo à risca as considerações que são impostas, define-se corretamente a janela de binário de uma junta. (Delphi E&S, 2007), (Delphi E&S, 2008)

3.7.3 Monitorização de binário

A monitorização de binário é um método de verificação de todas as etapas principais do processo de aperto de um parafuso, servindo-se para tal de curvas de binário. Deste modo, consegue-se facilmente saber em que momento o conjunto parafuso e junta falharam e com isso tomar decisões e/ou procedimentos para impedir que algo semelhante volte a acontecer. Assim,

e para fornecer uma explicação mais perceptível, vão ser apresentados os três casos de aparafusamento que se estabelecem na empresa.

3.7.3.1 1º Caso

Inicia-se com o processo de aparafusamento de um parafuso autorroscante num furo passante de uma placa de alumínio fundido, tal como representado na Figura 3.21. É de notar que os *seat torque* e *strip torque* são facilmente identificados, pelo que a identificação das outras fases é igualmente fácil (abertura de rosca e roscagem).

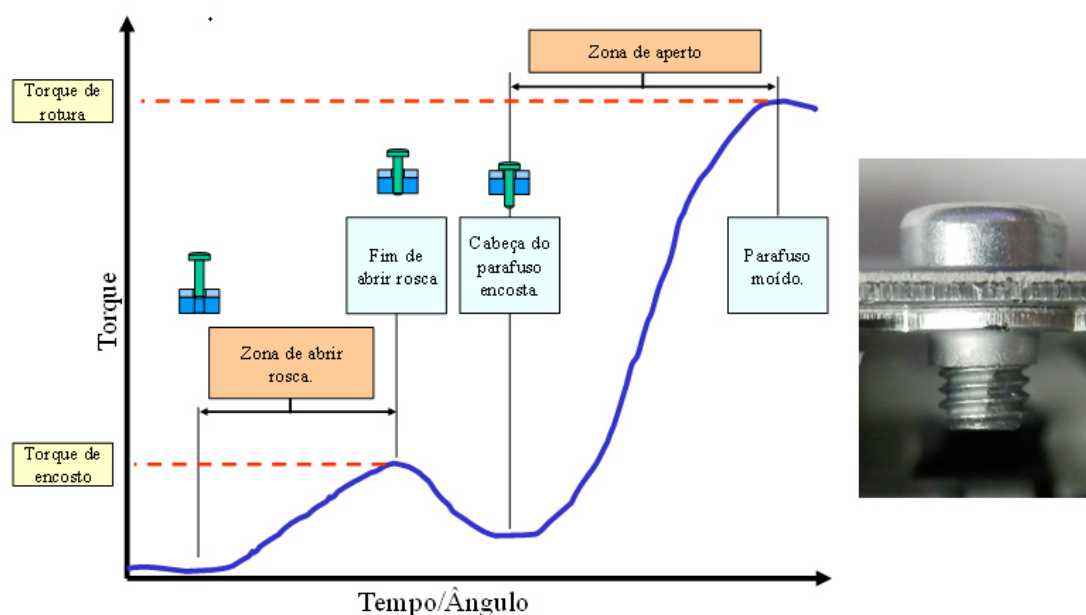


Figura 3.21 Processo de aperto de um parafuso autorroscante num furo passante (Delphi E&S, 2005)

Visto tratar-se de um furo passante, o parafuso cria rosca no furo, havendo uma nova zona, que corresponde à altura em que o parafuso passa livremente no furo, pois já não há material para abrir rosca e, por isso, o binário decresce radicalmente. Esta fase termina no encosto, altura em que o parafuso está “sentado”, seguindo-se o aperto e com isso um aumento radical nos valores de binário, até atingir a carga de aperto desejável. Em termos visuais, o primeiro pico corresponde ao binário usado para “sentar” o parafuso no respetivo furo, e o segundo corresponde ao binário de falha, em que o parafuso vai moer por binário excessivo de aperto. (Delphi E&S, 2008), (Delphi E&S, 2005)

3.7.3.2 2º Caso

De seguida, existe um aparafusamento em parte semelhante ao anterior, pois usa-se um parafuso autorroscante, mas agora num furo cego. Tal como se observa no gráfico da Figura 3.22, as diferenças são muito acentuadas.

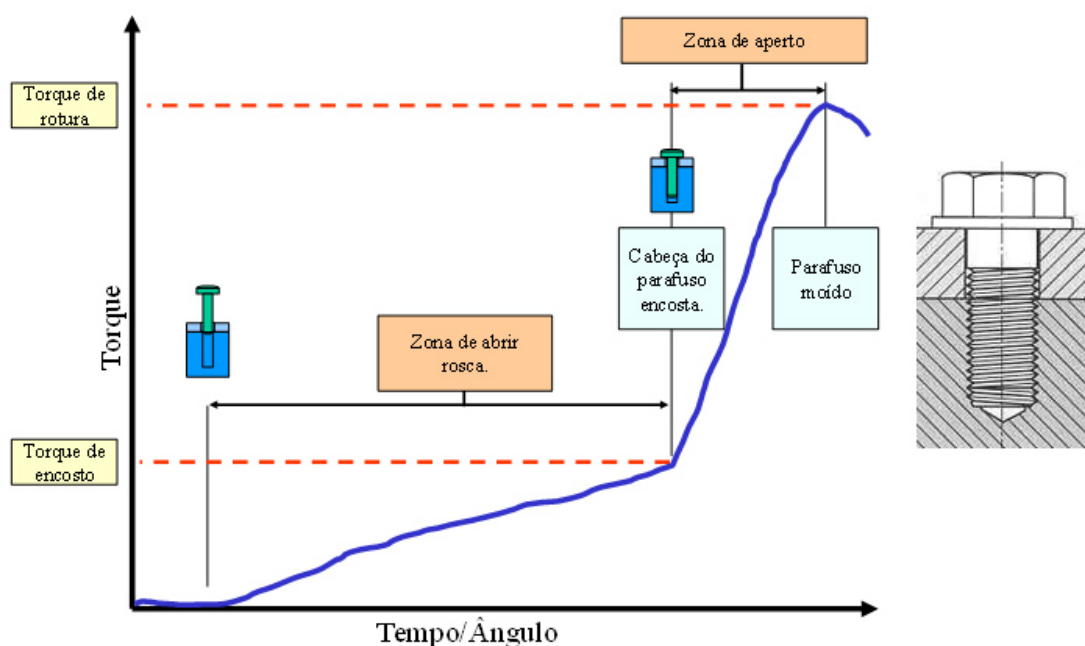


Figura 3.22 Processo de aperto de um parafuso autorroscante num furo cego (Delphi E&S, 2005)

O que sucede neste caso, relativamente ao anterior, é que a zona de abrir rosca é muito mais alargada e esta fase só termina quando o parafuso se “senta”. Isto acontece porque o furo é cego e, por isso, não há nenhuma zona “aberta” por onde o parafuso possa atravessar. Desta forma, o parafuso abre rosca até ocorrer uma paragem mecânica, efetuada pela cabeça do mesmo, o que significa que este está “sentado”. (Delphi E&S, 2005)

3.7.3.3 3º Caso

Apresenta-se o último caso de aparafusamento, usando um *machine screw* num furo cego pré-roscado pelo que surgirão ainda mais alterações.

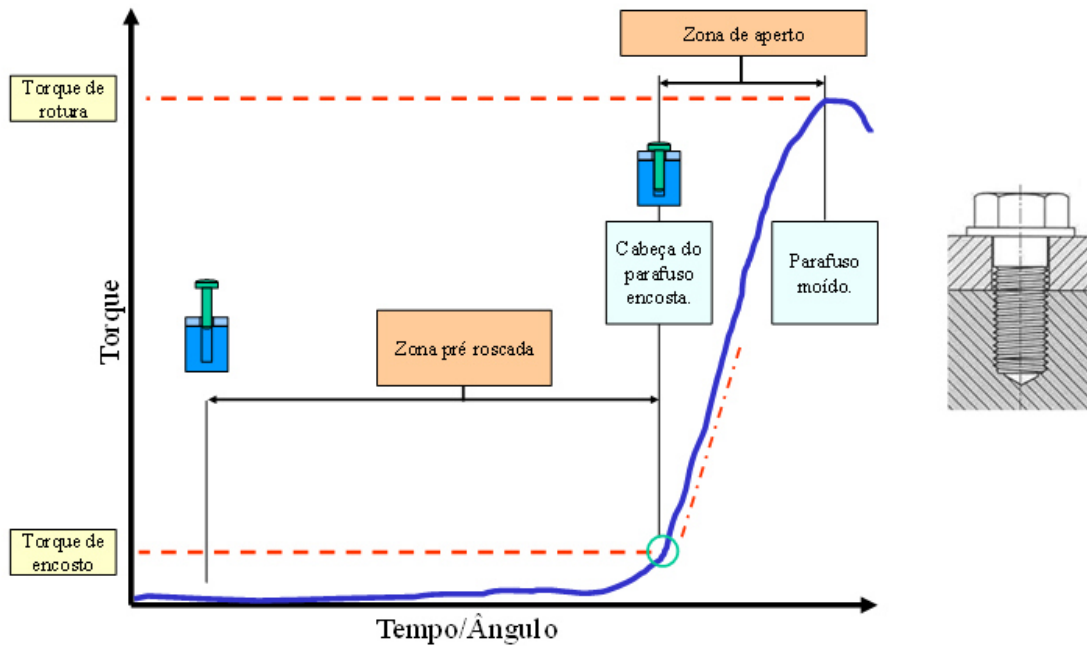


Figura 3.23 Processo de aperto de um parafuso do tipo machine screw num furo cego pré-roscado (Delphi E&S, 2005)

Como se pode verificar no gráfico da Figura 3.23, o binário de roscagem (até encosto) é muito baixo, sendo praticamente nulo, isso acontece pois o furo já se encontra roscado, havendo quase um encaixe perfeito entre as espiras do parafuso e os “vales” do furo. De seguida, ocorre o encosto, identificado pelo ponto onde a zona reta da curva de binário termina, representado pelo círculo verde. A partir deste momento, segue-se o aperto, onde o binário aumenta drasticamente até atingir a carga de aperto desejada. Todavia, se o binário for muito elevado, acaba por moer o parafuso, resultando em falha de aparafusamento, identificado pelo pico do gráfico. (Delphi E&S, 2007), (Delphi E&S, 2005)

Dá-se, assim, por concluído o estudo de binário e segue-se um outro, relacionado com a rotação que é aplicada num parafuso até estar corretamente “sentado” e todas as suas implicações.

3.7.4 Monitorização angular

Todas as *smart screw drivers*, as máquinas de aparafusar identificadas como as de qualidade superior, contêm a capacidade de contabilizar o ângulo de aperto. Esta capacidade permite detetar quando é que o parafuso não completou a rotação necessária tendo em conta o binário pretendido. Esta análise não vai prevenir os casos de parafusos mal “sentados” mas vai imediatamente detetar tais situações, durante o processo de aparafusamento, identificadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Erros detetáveis pela monitorização angular

| Monitorização angular permite detetar | |
|---------------------------------------|---|
| Erros de aperto | <ul style="list-style-type: none"> • Parafusos “mal sentados” • Parafusos muito longos ou muito curtos • Peças a mais ou a menos |
| Danos nos materiais ou nas peças | <ul style="list-style-type: none"> • Deficiência na zona roscada do parafuso • Variação nas dimensões do furo piloto • Variação ou danificação nas peças a serem ligadas |

Em termos angulares existem, assim, dois ângulos que podem ser medidos:

- Ângulo final;
- Ângulo total.

O ângulo final apenas é contabilizado a partir de um determinado momento e acaba quando o processo de aperto termina. É usado na deteção de parafusos “mal sentados” ou com espiras danificadas, pelo que a sua monitorização é necessária em todas as máquinas. O ângulo total é apenas opcional, pois mede o processo inteiro.

O gráfico, apresentado na Figura 3.24, representa um processo de aparafusamento, identificando a relação entre binário e ângulo. É estabelecido um binário de marcação, *torque threshold*, onde a partir desse valor, se começa a contar o ângulo final de aperto até se atingir o binário desejável. O valor de *torque threshold* é definido em um mínimo de 20% abaixo do valor do binário desejável. Assim, só se inicia a contagem de ângulo quando se estiver a 80% do processo de aparafusamento, esta é definida como a contagem de ângulo final. Contudo esta abordagem pode variar consoante o tipo e tamanho do parafuso usado.

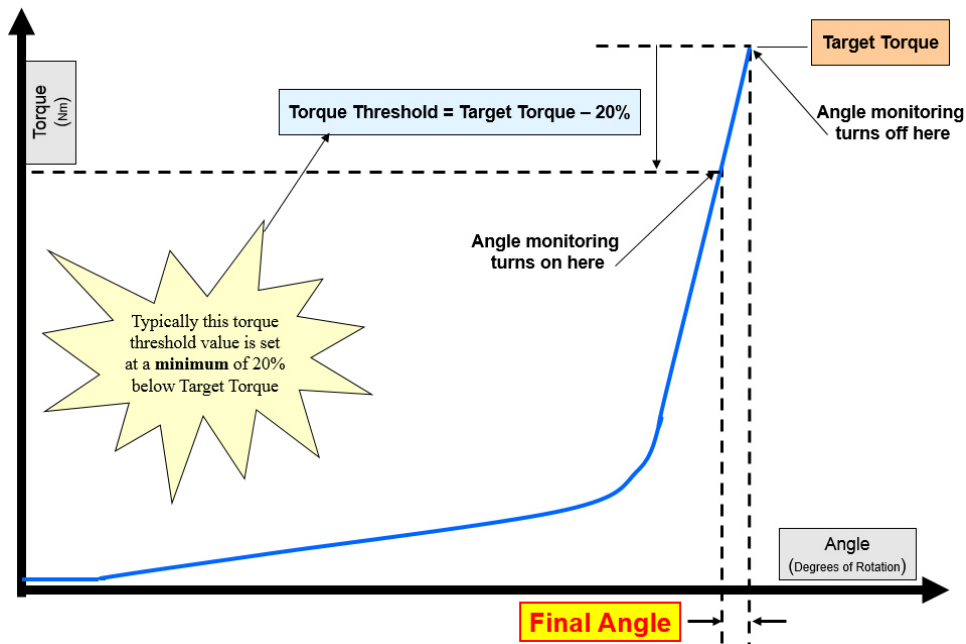


Figura 3.24 Processo de aparafusamento estabelecendo a relação entre binário e ângulo (Delphi E&S, 2008)

Previamente, foi mencionado que uma junta particular (*hard* ou *soft*) tem um percurso angular previsto, desde a altura em que o parafuso se senta até que este esteja corretamente apertado. Desta forma, antes de se proceder ao aparafusamento já se possui uma ideia teórica dos valores angulares que na prática se obterá, o que só por si já representa uma grande vantagem.

O ângulo final pode ser monitorizado em cada ciclo de aparafusamento, para detetar se o parafuso alcança a rotação desejável como também se alcança o binário desejável. Se a rotação ou o binário apropriados não forem alcançados, deve considerar-se o parafuso defeituoso e tomar uma ação apropriada. Quando tal acontece, na empresa, retira-se imediatamente o rádio da linha de produção e este segue para o sector de reparação, até estar pronto, para regressar novamente à linha.

A monitorização angular é um processo muito confiável quando implementado corretamente. Apenas poderá ser introduzido caso a geometria da junta esteja corretamente dimensionada, as partes a ligar estejam dentro das especificações e se o binário desejável e as tolerâncias forem cuidadosamente calculadas.

A monitorização de binário e ângulo constituem o benefício primário em utilizar *smart screw drivers*, particularmente em aplicações críticas. (Delphi E&S, 2008)

3.8 Validação de binário

Um planeamento e otimização adequados executarão um papel importante e necessário em garantir ligações de boa qualidade. No entanto, existem tantas variáveis que contribuem para o melhoramento de uma ligação que a verificação e validação são uma necessidade. A validação do processo de aperto durante a produção, através de estudos de binário e monitorização angular, constituem um procedimento crítico. Em adição, nada pode substituir a verificação “em curso” onde o *design*, especificações de aperto e tolerâncias adequadas continuam a ser alcançadas.

Contudo, apesar de todas as verificações feitas ao longo do processo de aperto, existe algo que pode ser feito após o término do processo. Este tipo de validação é apenas feito em termos de binário para, por um lado, verificar se o parafuso foi apertado com o binário desejável e, por outro, se esse binário corresponde ao que se encontra na base de dados, vindo do controlador da respetiva máquina. Assim, existem três métodos de verificação das especificações de binário: teste de binário do primeiro movimento, teste de binário de desaperto e teste de binário de marcação, todos estes representados nas Tabela 3.6 e Tabela 3.7. (Mountz, 2015)

Tabela 3.6 Testes de verificação de binário (parte 1) (Mountz, 2015)

| Testes de verificação de binário | |
|---|--|
| <u>Teste de binário do primeiro movimento</u> | 1. Traçar uma linha coincidente entre a peça e a cabeça do parafuso com um marcador |
| | 2. Usar instrumento de medição de binário analógico (Figura 3.2) para forçar o parafuso na direção de aperto até a linha deixar de estar coincidente |
| | 3. Registrar binário obtido |
| <u>Teste de binário de desaperto</u> | 1. Traçar uma linha coincidente entre a peça e a cabeça do parafuso com um marcador |
| | 2. Usar instrumento de medição de binário analógico (Figura 3.2) para desapertar o parafuso até a linha deixar de estar coincidente |
| | 3. Registrar binário obtido |

Tabela 3.7 Testes de verificação de binário (parte 2) (Mountz, 2015)

| | |
|-------------------------------------|---|
| <u>Teste de binário de marcação</u> | 1. Traçar uma linha coincidente entre a peça e a cabeça do parafuso com um marcador |
| | 2. Desapertar completamente o parafuso |
| | 3. Usar instrumento de medição de binário para apertar novamente o parafuso até a linha estar coincidente |
| | 4. Registrar binário obtido |

Capítulo 4 Enquadramento ao Projeto e definição da solução

Nesta secção será dada uma explicação mais teórica do que foi realizado em ambiente industrial, onde se efetuará um enquadramento ao projeto a desenvolver. Desta forma, numa fase inicial ter-se-á uma ideia dos problemas que ocorrem no processo de aparafusamento e tentar-se-á definir as supostas causas.

De seguida, e tendo feito um estudo do que ocorria, “transformar-se-ão” os problemas apresentados num que se possa resolver. Com isto, será feita uma definição mais aprofundada do problema em causa.

Finalmente, e após ter sido feita uma avaliação ao problema, definir-se-ão os requisitos inerentes à solução para a obtenção de uma melhor definição da mesma.

4.1 Obstáculos de aparafusamento

Como multinacional, a empresa produz milhares de rádios todos os dias, mantendo uma média de cerca de 6 mil rádios diários. Desta forma, muitos são os problemas associados a esta elevada cadência de produção, tendo como “culpados” as máquinas, os equipamentos, as peças ou as pessoas. Como já referenciado, a empresa serve-se de máquinas manuais e de outras controladas digitalmente, chamadas robôs. Ambas apresentam falhas, as manuais, sendo manuseadas por operários, milhares de vezes por dia, sofrem altas cadências de vibração, tensão e, conseqüentemente, alguma temperatura, danificando várias partes da máquina de aparafusar sendo mais sentidas na zona do *bit* e respetiva zona de aperto. Deste modo, ocorre a danificação dos *bits* e, conseqüentemente, uma descalibração no aperto, resultando em aparafusamentos mal efetuados.

Por outro lado, e visto estas máquinas estarem intimamente ligadas à componente humana, tem de haver uma sensibilização e um procedimento a seguir por parte desta, de forma a reduzir os danos e aumentar a cadência de produção.

No que aos robôs diz respeito, os problemas estão relacionados com os seus programas e respetivo *software*, falhas de rede, inserção de objetos dentro da zona de trabalho da máquina, entre outros.

Quando se discute sobre equipamentos fala-se em *ergo-arms*, “dispositivos”, bases e bancadas de trabalho, variáveis do processo de aparafusamento já apresentadas.

Os *ergo-arms* têm de estar corretamente fixos na mesa de trabalho, garantindo sempre que mantêm uma ligação estável com a respetiva máquina de aparafusar e ainda mantendo a perpendicularidade entre esta e a peça. No entanto, isto nem sempre é fácil de garantir, pois a cadência de trabalho é muito elevada, transmitindo diversas tensões tanto na máquina de aparafusar como no *ergo-arm*. Desta forma, podem aparecer folgas na ligação ou mesmo nos braços articulados do *ergo-arm*. Por outro lado, tem também de haver um cuidado ao montar o *ergo-arm*, pois se a sua base não estiver perpendicular à mesa, também todo o *ergo-arm* não estará, pelo que a máquina nunca irá manter uma direção desejável.

Os “dispositivos” e as bases de trabalho têm de estar cuidadosamente desenhados e com as tolerâncias desejáveis, serem de uso prático para melhor e mais rápida produção. Além disso, tem ainda de haver cuidado na escolha do material a selecionar para não danificar os *bits*.

As mesas têm de estar limpas e organizadas para não haver obstáculos na produção, permitindo que o processo flua rápida e eficazmente.

As peças de trabalho também possuem os seus problemas, que tal como os “dispositivos”, centram-se no seu *design* e respetivas tolerâncias, se algo for mal definido, o aparafusamento será defeituoso.

Finalmente, o capital humano é de extrema relevância para qualquer empresa, talvez a parte mais essencial da linha de produção. Assim, as pessoas têm a responsabilidade de usar os equipamentos adequadamente, realizar os aparafusamentos de forma cuidada e rápida e ainda de avaliar situações de maus aparafusamentos. Durante o processo, o operador vê num ecrã, a sequência de aparafusamento a seguir e se cada parafuso que aperta está bom ou mau, de acordo com as janelas de binário e ângulo definidas. Contudo, muitas vezes o visor mostra que o aparafusamento foi mal efetuado mas o operador em questão apercebe-se que está tudo bem e que foi então um erro da máquina. Neste caso, o operador pode fazer *reset* na máquina e passar o rádio para o posto seguinte, admitindo-o como bom. Caso os operadores não sigam todos os procedimentos adequados e que não prestem grande atenção ao seu trabalho, as consequências podem ser catastróficas.

Como referido, muitos são os problemas que advêm do processo de aparafusamento, todavia serão apenas expostos os seus principais problemas:

- Parafusos mal “sentados”, representado na Figura 4.1;



Figura 4.1 Parafusos mal "sentados"

- Parafusos com cabeças desgastadas, representado na Figura 4.2;



Figura 4.2 Parafuso com cabeça moída (Thumper Talk, 2008)

- Parafusos com espiras desgastadas, representado na Figura 4.3;

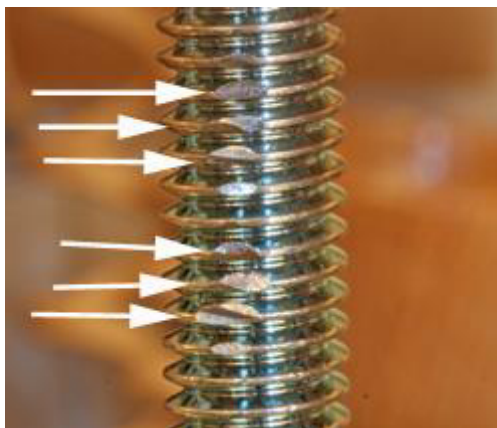


Figura 4.3 Espiras danificadas (New Metal Worker, 2014)

- Parafusos a menos dentro da peça completamente apertada representado na Figura 4.4;



Figura 4.4 Peça apertada com parafuso a menos

- Parafusos a mais dentro da peça completamente apertada, representado na Figura 4.5;

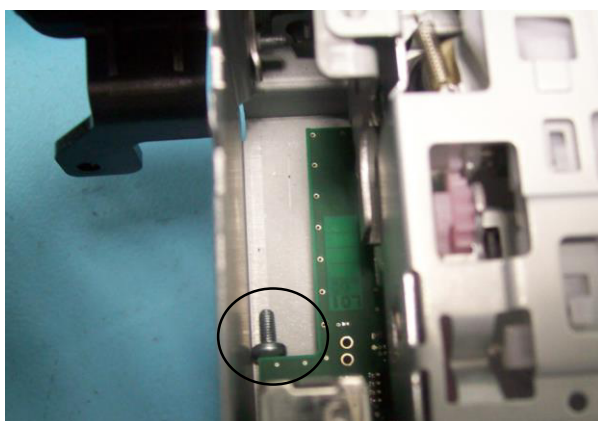


Figura 4.5 Peça apertada com parafuso a mais

- Danos na placa de circuito (*PCB*) ou nos restantes componentes, causados pela entrada do parafuso na peça, representado na Figura 4.6.

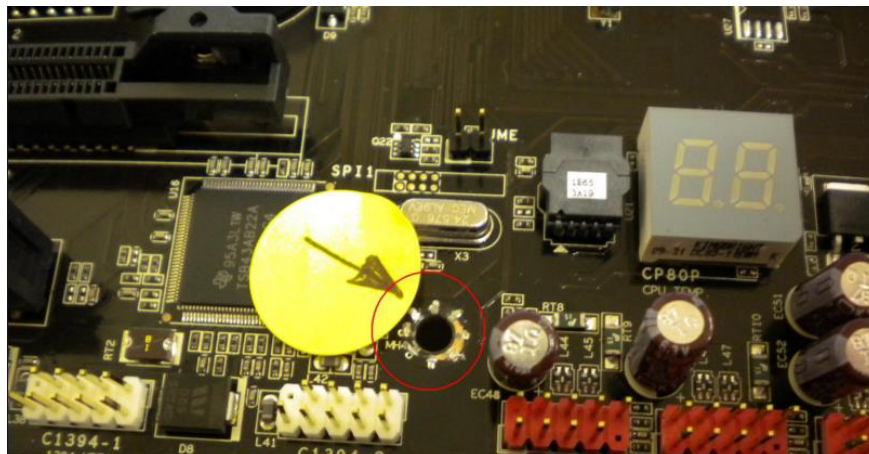


Figura 4.6 Danos na placa *PCB* (Over Clock, 2010)

Fazendo uma análise dos problemas e possíveis causas, chegou-se a uma simples conclusão, para aquelas situações onde existem parafusos mal sentados, que desaparecem ou estão a mais na peça, as causas seriam ou dos operários e/ou da tecnologia. Os operários são a componente humana deste intenso processo pelo que estão sempre sujeitos ao erro. Na tecnologia, outras situações podem acontecer, tais como: falhas nos controladores, falha de rede e consecutiva falha do sistema, programas desadequados, falha da comunicação entre operário e máquina, entre outros.

Para as restantes opções, cabeças e espiras, *PCB*'s e outros componentes danificados, a causa seria dividida em três partes, a digital, a mecânica e a pessoal. A digital e pessoal pelas mesmas razões referidas. A causa mecânica pelos componentes que intervêm no processo de aparafusamento como, peças, parafusos, *bits*, "dispositivos", bases, máquinas de aparafusar, *ergo-arms* e mesas. Deste modo, as peças, parafusos, bases e "dispositivos" mal dimensionados, máquinas com programas desadequados, mesas desorganizadas, *ergo-arms* defeituosos, são apenas alguns exemplos.

4.2 Definição do problema

Face aos obstáculos anteriormente apresentados, várias foram as soluções expostas pela equipa de aparafusamento da empresa, todavia uma resolvia grande parte dos problemas apresentados.

A ideia era, medir a orientação da máquina de aparafusar relativamente à mesa de aparafusamento. Acontece que, por um lado, ao fim do uso tão constante associado a algumas vibrações, a máquina de aparafusar começa a “ganhar” folga na garra do *ergo-arm* (peça de ligação entre o *ergo-arm* e máquina de aparafusar) e a perpendicularidade perde-se. Por outro lado, como não há garantias que os *ergo-arms*, equipamento que é usado, montado e desmontado ao longo dos anos, esteja sem folgas e sem danos na sua estrutura, também não há garantias que estes estabeleçam uma ligação estável com a máquina de aparafusar e, preponderantemente, que estes garantam a perpendicularidade.

Assim, mesmo que o parafuso seja colocado perpendicularmente à mesa, posteriormente ele vai ficar inclinado, pois a máquina encontra-se desalinhada, o que resultará num parafuso mal inserido dentro do furo. As consequências podem ser catastróficas, desde parafusos mal “sentados” e espiras rompidas até problemas maiores, afetando outros componentes que estejam inseridos na peça a ser aparafusada.

Para concluir e definindo como uma certeza que as mesas de aparafusamento estavam em boas condições, o problema concentrar-se-ia no conjunto, máquina de aparafusar e *ergo-arm*.

4.3 Requisitos para a solução

Sabendo exatamente o pretendido, definiram-se algumas restrições para este projeto ser preciso, útil e prático. Tratando-se de um medidor angular de um processo muito meticuloso, teria de ter um grau de precisão elevado, pois não se esperavam grandes desfasamentos angulares. Por outro lado, teria de ser um dispositivo pequeno e leve para fazer com que a tarefa de medição fosse fácil de executar e não um processo complexo. Teria também de ser um dispositivo de pequenas dimensões, pois opera-se com pequenos equipamentos, nomeadamente, as máquinas de aparafusar, as quais não permitem muito espaço de manobra.

Além disso, teria de ser prático no que concerne ao processo de obter sucessivas medições em equipamentos diferentes, permitindo efetuar corretamente o seu propósito sem que para tal houvesse muitos obstáculos.

Para concluir, seria um projeto de baixo custo, por duas razões principais, a saber, primeiro, porque não havia grandes fundos para explorar o sucesso de uma solução e segundo, porque se fosse do interesse da empresa introduzir este dispositivo na linha de produção, não poderia acarretar um grande valor económico.

4.4 Definição da solução

Sendo o problema em estudo tratar-se de uma medição angular, não seria possível ou seria muito mais complexo recorrer apenas à mecânica, pelo que a solução passa pela junção de três vertentes, a eletrónica, a informática e a mecânica. O objetivo era recorrer à eletrónica para criar um sistema onde fosse possível, medir um ângulo em relação a um referencial, mostrar esse ângulo num visor e ainda avisar quando o desfasamento angular fosse superior a um determinado limite. Para a obtenção de um desfasamento angular para algo que está torto ou que não se encontra na posição desejada, usar-se-ia o referencial “Terra”, ou seja, tendo a direção da gravidade, representada na Figura 4.7.

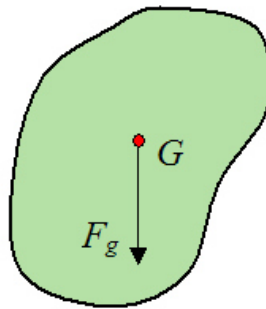


Figura 4.7 Representação da direção da força da gravidade (Engineering Toolbox, 2015)

Isto funcionaria para o caso em questão, admitindo-se um determinado valor para a direção da gravidade e caso esse valor não fosse atingido a máquina estaria torta, caso contrário tudo estaria bem.

No entanto, isto só funcionaria recorrendo à informática, ou seja teria de se programar este sistema de forma a enviar as “ordens” e receber as respetivas informações.

No que respeita à componente mecânica, o objetivo era construir uma estrutura que conseguisse conter e proteger todos os componentes do sistema eletrónico e garantir que estes tivessem na correta posição. Para permitir realizar as medições, seria preciso calibrar inicialmente o dispositivo para de seguida realizar a medição ao objeto de estudo. Sintetizando, a estrutura teria de ficar estável em cima de uma mesa de aparafusamento e ainda conseguir “agarrar-se” a uma máquina de aparafusar.

Concluiu-se que através da combinação de três “ciências” diferentes, seria possível obter medições fidedignas e, por isso, esta foi a solução escolhida para resolver o problema proposto.

Capítulo 5 Desenvolvimento e validação da solução protótipo

Ao contrário da primeira parte deste capítulo, seguir-se-á uma explicação com uma vertente mais prática do desenrolar do estágio. Após se ter “escolhido” o problema e definido a solução, segue-se o passo crítico, criar a solução. Depois de analisar todas as restrições e necessidades impostas, foi possível projetar e desenvolver um protótipo que permitisse corresponder aos requisitos impostos.

Para finalizar será testado o protótipo, começando por testar o grau da sua fiabilidade para de seguida realizar medições na linha de produção da empresa, recolher e analisar os resultados.

5.1 Elaboração do protótipo

Como definido anteriormente, este dispositivo vai servir-se de três “ciências”, a mecânica, a eletrónica e a informática. Assim, vai ser dada uma explicação das diferentes vertentes deste conjunto, começando pela eletrónica e seus componentes, seguindo-se a programação do sistema e terminando na parte estrutural.

Para fazer uma inicialização a esta secção, resolveu-se expor ambos os protótipos elaborados, representados na Figura 5.1 e todas as peças que destes farão parte, representadas nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2. Esta simples visualização e identificação tornava possível saber *a priori* a dimensão deste projeto bem como todos os componentes do qual o mesmo se serviria.



Figura 5.1 Protótipo 1 (à esquerda) e protótipo 2 (à direita)

Tabela 5.1 Lista de peças dos protótipos a desenvolver (parte 1)

| Lista de peças do dispositivo de perpendicularidade | |
|---|---|
| Sistema eletrónico | |
| <u>Peça</u> | <u>Designação</u> |
| <i>Arduino</i> | <i>Arduino nano</i> |
| <i>IMU</i> | <i>MPU 6050</i> |
| <i>Display</i> | <i>LCD Nokia 5510</i> |
| Sensor sonoro | <i>Buzzer module keyes</i> |
| Botão de <i>reset</i> | Botão de impulso |
| Botão da pilha | Interruptor <i>ON/OFF</i> |
| Pilha | Pilha quadrada de <i>9V</i> |
| <i>PCB</i> | Placa de circuito impresso feita "à medida" |
| Conector | Conector para a pilha de <i>9V</i> |
| Sistema mecânico | |
| <u>Peça</u> | <u>Designação</u> |
| Tampa 1 e 2 | Prototipagem |
| Caixa | Prototipagem |

Tabela 5.2 Lista de peças dos protótipos a desenvolver (parte 2)

| Sistema mecânico | |
|--------------------------------|--|
| <u>Peça</u> | <u>Designação</u> |
| “Braçadeira” | Peça de ligação do <i>ergo-arm D57</i> |
| 8x Parafusos autorroscantes | 6x <i>PT® M2.2x7</i> |
| | 2x <i>PT® M1.95X12</i> |
| 2x Parafusos Sextavado Interno | <i>M5x30</i> |
| 2x Anilhas | Anilhas Planas |

Estando todas as partes definidas, segue-se o *assembly*, criando-se assim o primeiro protótipo, apelidado de dispositivo de perpendicularidade. Após uma análise das vantagens e desvantagens do protótipo original, optou-se por desenvolver um outro, que iria satisfazer desejavelmente todas as necessidades impostas.

5.1.1 Sistema eletrónico

Para o sistema eletrónico, o principal objetivo consistia em ter um componente capaz de medir um desfasamento angular em relação a um referencial e outro capaz de “ler” essa informação e transmiti-la para uma interface visual. Para tal, pensou-se num *IMU (Inertial Measurement Unit)*, num botão e num *Arduino*. O primeiro continha vários sensores no seu interior que lhe permitiam a medição de um ângulo e o segundo tornava possível estabelecer a comunicação com todo este sistema digital, finalmente, o *Arduino* seria o “cérebro” do sistema, tendo a capacidade de programar e recolher informação dos outros dois componentes. Desta forma, programava-se o *Arduino* para atuar no *IMU*, escolhendo qual o ângulo a medir e recolher a respetiva informação. Por outro lado, também controlava o botão, para “zerar” o sistema, ou seja quando se pressionasse o botão o *Arduino* recebia a informação para fazer *reset* ao sistema e admitir que o ângulo era zero, estabelecendo-se a posição perfeita.

No entanto, para garantir que os requisitos do projeto eram atingidos, teria de haver a presença de mais dois componentes, mais propriamente um *buzzer* e um *LCD*. Aquele introduzia um efeito sonoro, de forma a avisar quando o desfasamento angular tivesse ultrapassado um limite anteriormente definido. O *LCD* apenas dava uma imagem visual do desfasamento angular obtido. Tal como para os anteriores, estes novos componentes estariam sob as “ordens” do *Arduino*.

Para melhor interpretação dos componentes usados e do respetivo conjunto eletrónico, será feita uma explicação mais pormenorizada.

5.1.1.1 Arduino

Um *Arduino* é uma plataforma de *software* livre usada para construir projetos eletrónicos. Consiste numa placa física programável, muitas vezes chamada de microcontrolador e um *software* ou *IDE (Integrated Development Environment)* que “corre” no computador, permitindo escrever e descarregar código informático para a placa física.

A plataforma *Arduino* tem ficado muito popular entre quem gosta de fazer “experiências eletrónicas”. Uma placa *Arduino* é capaz de ler *inputs*, como por exemplo: a presença de luz num sensor, a deteção do dedo num botão ou uma mensagem *Twitter* e torná-los em *outputs*, ativar um motor, acender um *LED*, publicar algo *online*. Pode-se “dizer” à placa o que fazer, enviando uma série de instruções para o microcontrolador. Para tal é apenas necessário usar a linguagem de programação do *Arduino* e o respetivo *software (IDE)*. (Arduino, 2015)

O *Arduino* selecionado para este projeto foi o *Arduino Nano*, como representado na Figura 5.2.

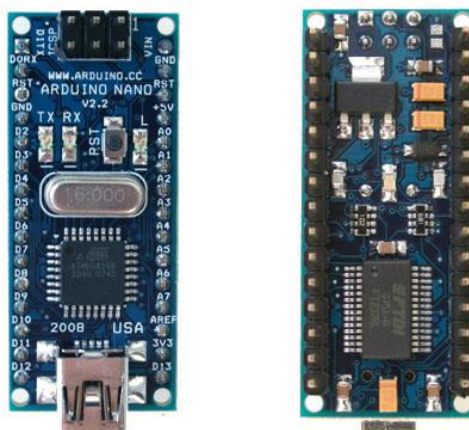


Figura 5.2 *Arduino Nano* (Solid, 2011)

Ao contrário da maior parte das anteriores placas de circuito, o *Arduino Nano* não precisa de outro componente de *hardware*, chamado de *programmer* para descarregar um novo código para a placa, agora apenas se precisa de usar um cabo *Mini-B USB* e ligar diretamente ao computador. Para facilitar ainda mais a sua utilização, o *software* do *Arduino* usa uma versão simplificada da linguagem *C++*, tornando o processo de aprender a programar muito menos complexo. (Arduino Nano, 2015)

Finalmente, e como se observa na Figura 5.2, este elemento eletrônico apresenta dimensões muito reduzidas, o que foi um fator muito relevante na escolha deste componente.

5.1.1.2 IMU

O *IMU* (*inertial measurement unit*) é um dispositivo eletrônico que mede informação relativa aos movimentos lineares e angulares, usando para tal uma combinação de giroscópios e acelerômetros. (Xsens, 2015)

O *IMU* usado para este projeto não precisava de ter muitas funções, contudo escolheu-se um *MPU-6050*, representado na Figura 5.3, que contém, em um único *chip*, um acelerômetro e um giroscópio.

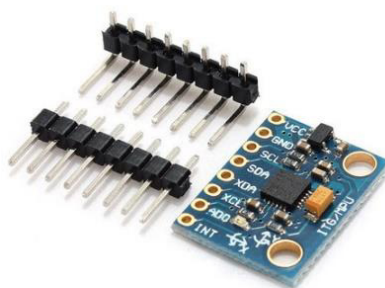


Figura 5.3 *IMU* (Ebay, 2015)

Apresenta 3 eixos para o acelerômetro e 3 eixos para o giroscópio, sendo ao todo 6 graus de liberdade.

Para concluir, é um elemento eletrônico que possui alta precisão, pois captura os planos *xx*, *yy* e *zz* ao mesmo tempo. (Sparkfun, 2015)

5.1.1.3 Botão

O botão usado foi um simples componente de pressão, com porca para fixação, como representado na Figura 5.4. É, como anteriormente mencionado, usado para fazer *reset* na contagem angular quando pressionado.



Figura 5.4 Botão (Aquário, 2015)

Assim, cada vez que se pressiona o botão, o desfasamento angular fica igual a zero e admite-se que essa posição é a desejável.

5.1.1.4 LCD

O *LCD* é um outro componente eletrónico que dispõe de uma placa elétrica e um visor para expor a informação angular obtida.



Figura 5.5 LCD *Nokia 5510* (Speedytek, 2015)

Visto que se tentou fazer um protótipo de baixo custo optou-se por usar um *LCD* do telemóvel *Nokia 5510*, como representado na Figura 5.5. Por um lado, satisfazia as necessidades impostas e, por outro, era uma solução bastante económica, pelo que foi a escolha ideal.

5.1.1.5 Buzzer

O *buzzer* ou besouro, representado na Figura 5.6, é o último componente do conjunto eletrónico, onde apenas tem a função de emitir um sinal sonoro sempre que a contagem angular ultrapassar o limite definido e programado no *Arduino*.

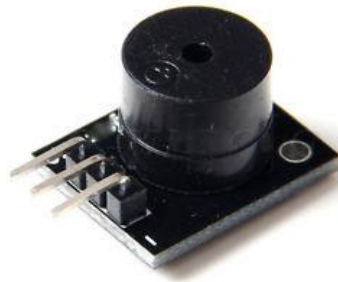


Figura 5.6 Buzzer (FastTech, 2013)

O principal objetivo deste componente é alertar o utilizador para um desfasamento angular exagerado.

5.1.1.6 Conjunto eletrónico

Após terem sido identificados todos os componentes que faziam parte deste sistema, chegava a altura de estabelecer as suas ligações. Não havendo grande conhecimento na área da eletrónica, foi solicitada a ajuda de profissionais para solucionar este problema.



Figura 5.7 Componentes eletrónicos

No entanto, ainda antes de isso ocorrer, teria de se definir qual a disposição que os componentes, representados na Figura 5.7, iriam ter e qual o espaço que ocupariam. Visto ter-se a maior parte dos componentes eletrónicos em formato *CAD*, conseguido através do *website: GrabCad*, foi mais fácil realizar um esboço.

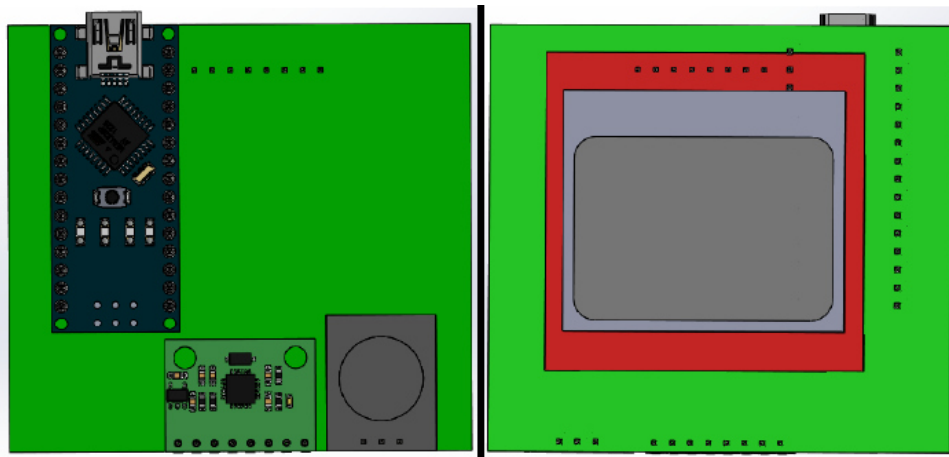


Figura 5.8 Disposição dos componentes eletrônicos pela placa *PCB*

Como discutido anteriormente, a solução para o problema da perpendicularidade teria de ser o mais reduzida possível, pois não havia muito espaço de manobra. Assim, definiu-se que a disposição presente na Figura 5.8 seria a mais inteligente, pois garantia que todos os componentes fossem ligados sem que os pinos de uns embatessem nos pinos dos outros. Apesar de não haver um grande desperdício de espaço, desenhou-se uma placa um pouco maior do que o estritamente necessário, garantindo deste modo que havia sempre possibilidade de introduzir um outro componente ou de realizar alguma modificação.

Apenas não ficou definido como estaria ligado o botão, no entanto, havia sempre duas hipóteses, ou soldava-se diretamente na placa, ou ligava-se através de cabos, não havendo limitação de espaço.

Para finalizar, não foi possível realizar a construção deste sistema em formato final, pois ainda faltava definir a parte estrutural do dispositivo. Sendo assim, apenas se estabeleceu o teste de funcionamento numa placa de ensaio.

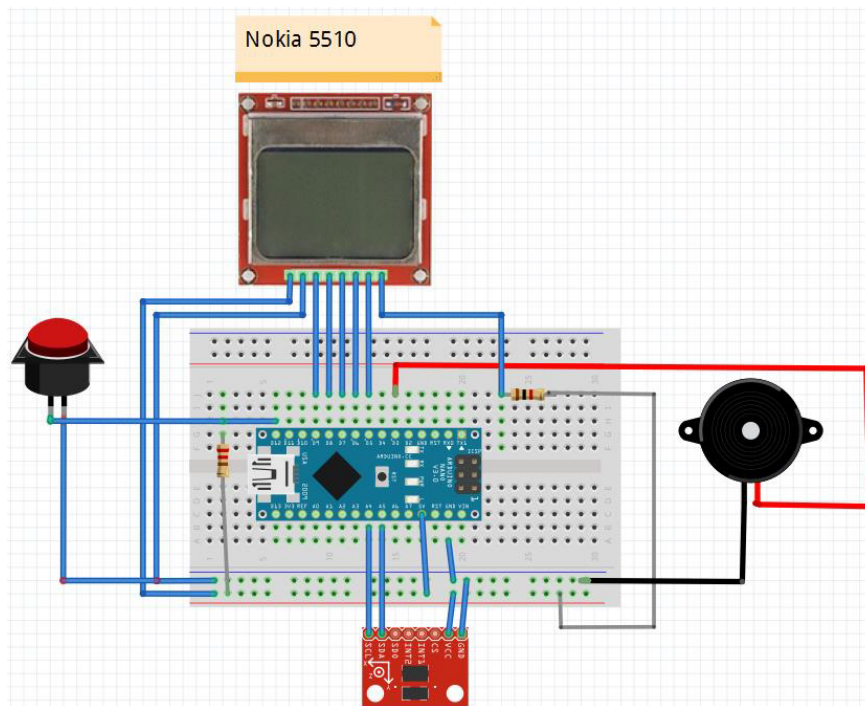


Figura 5.9 Teste de funcionamento numa placa de ensaio

Não se fotografou o circuito enquanto este teste foi desenvolvido pelo que, na Figura 5.9, está representado um esquema em formato digital, para tal ser possível recorreu-se ao programa *Fritzing*. Desta forma, dá-se uma noção bem mais visual e fácil de entender de todas as ligações.

Assim, tinha-se o *Arduino* no centro da placa, estabelecendo ligações com todos os outros componentes. Como se observa, existem cinco ligações para o *LCD*, que permitem a transmissão de informação para apresentação de resultados, uma ligação para o botão e outra para o *buzzer*. O primeiro funciona como um *input*, sempre que é pressionado é feito o *reset* ao sistema e o segundo como um *output*, sempre que se ultrapassa o limite dos cinco graus é emitido um sinal sonoro. Existem ainda duas ligações para o *IMU*, estas correspondem a um protocolo de comunicação que permite estabelecer a transmissão de informação entre o *Arduino* e o *IMU* permitindo efetuar as medições angulares. Para possibilitar o funcionamento de todo o sistema teria de haver alimentação, pelo que todos os componentes eletrónicos estão ligados às portas *ground* e 5V do *Arduino*. Por último, conseguem-se ver duas resistências, uma para o botão e outra para o *LCD*, que servem para reduzir a corrente elétrica de forma a permitir o correto funcionamento destes componentes.

Para concluir, já se tinha definido um conjunto que ocupava o mínimo espaço possível e que funcionava como se pretendia, pelo que apenas tinha de se adaptar a parte estrutural à parte eletrónica e vice-versa.

5.1.2 Sistema informático

Ao longo desta dissertação, pretendeu-se clarificar dois pontos, descobrir um determinado ângulo e saber quais os componentes que permitiam que isso acontecesse. No entanto, ainda não foi feita uma abordagem do modo como isso iria acontecer.

Como já foi dito, o principal objetivo da informática usada é ler, transmitir e recolher dados e este era o cerne do problema. A dificuldade estava em descobrir uma forma de programar o *Arduino* para comunicar com os restantes componentes eletrónicos e com isso obter uma medição.

Tal como para a eletrónica, também na área da programação, não havia grande conhecimento pelo que foi necessário recorrer a exemplos e a casos comerciais que ajudassem a obter uma solução. Apesar de nem tudo ter sido relevante, descobriu-se um exemplo muito interessante, que explicava como um *Arduino* comunicava com um *IMU*, apresentado no anexo 8 desta dissertação. Contudo, esta descoberta não foi suficiente para atingir a resolução do problema, pois havia ainda muito por definir. Posto isto, foi obrigatório solicitar a ajuda de alguns profissionais e deste modo foi possível adaptar o exemplo referenciado ao problema atual, criando-se um novo código que pudesse ser lido e transmitido pelo *Arduino*.

Assim sendo, na tentativa de dar uma explicação do que foi feito, optou-se por esquematizar como este sistema funcionava mas de uma forma diferente. Decidiu-se que não se usaria a mesma sequência do código e optou-se antes por mostrar como o processo de medição era elaborado. Portanto, fez-se uma explicação simples e mais visual ao invés de definir tudo o que o código fazia. Em primeiro lugar, porque não havia conhecimento para tal, e em segundo, porque tornaria esta dissertação muito focada na programação, quando apenas se serve dela para atingir um objetivo maior.

Para finalizar esta abordagem, dividiu-se o esquema em duas partes, passos e observações. Os passos correspondem, de forma muito simplificada, ao desenrolar do processo de medição e as observações, explicam de forma mais corrente o que sucede em cada passo.

Antes de iniciar a explicação do esquema, tem de ser feita uma referência às variáveis que guardam os valores de medição, *gravityHold* e *gravity*. A primeira representa um vetor que indica sempre a direção da gravidade e, por isso, funciona como uma referência ao longo de todo o processo. A variável *gravity* representa também um vetor mas que depende da direção do *IMU*. A diferença entre as duas é que uma é sempre constante e outra varia consoante a orientação do *IMU* variar.

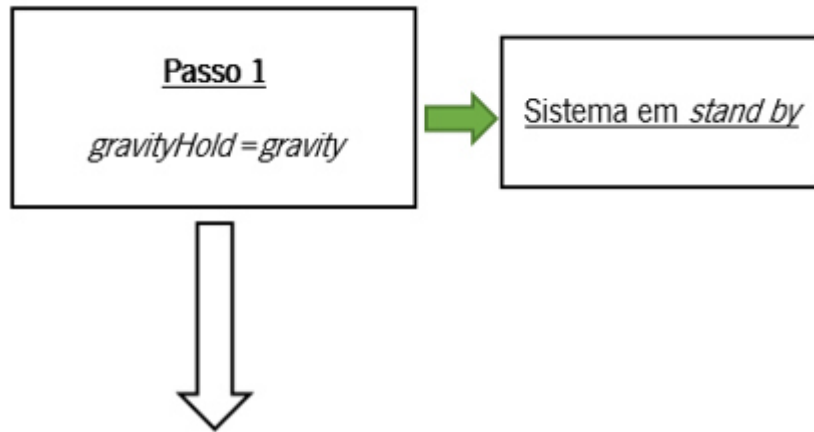


Figura 5.10 Primeiro passo do processo de medição

Assim, começa-se pelo estado de “espera”, onde o sistema está pronto a medir mas ainda nenhuma ação foi executada. Nesta fase, ambas as variáveis apresentam valores iguais a zero graus, como se verifica na Figura 5.10.

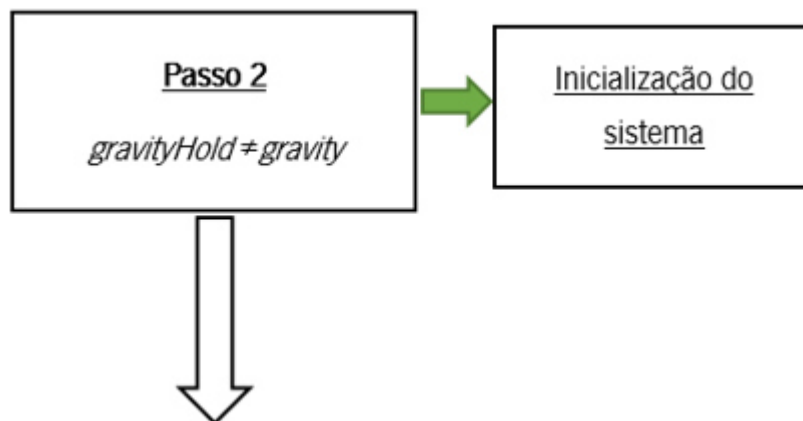


Figura 5.11 Segundo passo do processo de medição

A partir do momento que se começa a movimentar o dispositivo há uma variação na orientação do *IMU* e estas variáveis deixam de ter valores iguais, assume-se então que o processo de medição iniciou, como se observa na Figura 5.11. Na realidade, o processo já terminou, pois tudo acontece em frações de segundo, a partir do momento em que o sistema deteta movimento, começa a calcular e a apresentar resultados. No entanto, e para se explicar teoricamente o que acontece, admite-se que o processo ocorre de forma mais lenta, apresentando-se individualmente cada etapa.

Assim, assume-se que no passo 2 o sistema ainda não calculou ou registou qualquer valor, apenas identificou que as suas variáveis apresentam valores diferentes.

Posto isto, atinge-se ao passo 3, a fase onde se calcula o ângulo pretendido, apresentada na Figura 5.12. O ângulo que se pretende descobrir é aquele que se encontra entre as duas variáveis, a direção da gravidade e a direção do *IMU*.

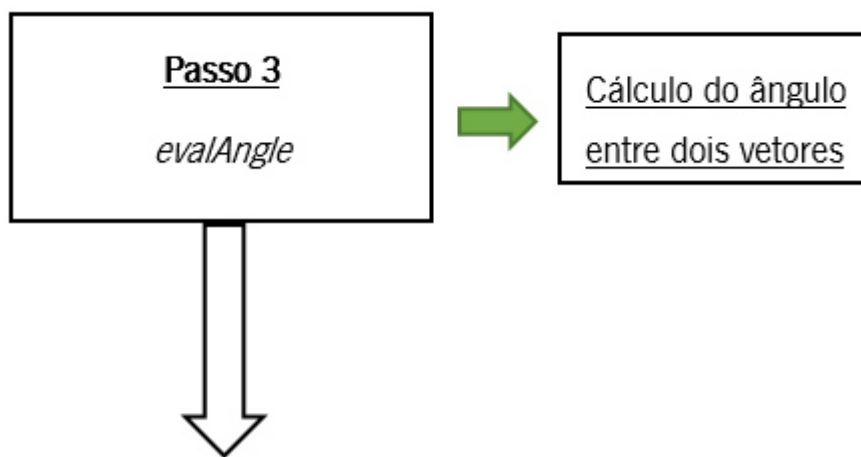


Figura 5.12 Terceiro passo do processo de medição

Assim, precisava-se apenas de recorrer à matemática para descobrir como medir um ângulo entre dois vetores. Para isso usou-se o método do produto interno entre dois vetores, facilmente explicado na Figura 5.13.

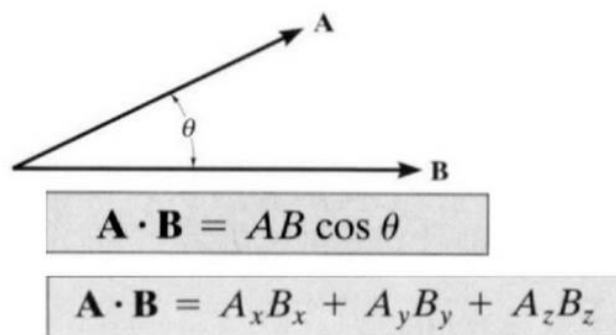


Figura 5.13 Representação e cálculo matemático do produto interno entre dois vetores (In SlideShare, 2014)

Recorrendo à ajuda de profissionais da área de programação, foi possível transformar este cálculo analítico em código computacional, adquirindo uma nova forma, como se observa na Figura 5.14.

```

float Angle_Dot_Product(VectorFloat vector1, VectorFloat vector2)
{
    vector1.x = ((int)(vector1.x * 1000.f)) / 1000.f;
    vector1.y = ((int)(vector1.y * 1000.f)) / 1000.f;
    vector1.z = ((int)(vector1.z * 1000.f)) / 1000.f;

    float amp1 = sqrt(vector1.x * vector1.x + vector1.y * vector1.y + vector1.z * vector1.z);

    vector1.x /= amp1;
    vector1.y /= amp1;
    vector1.z /= amp1;

    vector2.x = ((int)(vector2.x * 1000.f)) / 1000.f;
    vector2.y = ((int)(vector2.y * 1000.f)) / 1000.f;
    vector2.z = ((int)(vector2.z * 1000.f)) / 1000.f;

    float amp2 = sqrt(vector2.x * vector2.x + vector2.y * vector2.y + vector2.z * vector2.z);

    vector2.x /= amp2;
    vector2.y /= amp2;
    vector2.z /= amp2;

    return acos(vector1.x * vector2.x + vector1.y * vector2.y + vector1.z * vector2.z) * 180.0f / M_PI;
}

```

Figura 5.14 Fórmula de produto interno entre dois vetores em formato de código computacional

As fórmulas são iguais, apenas estão escritas em linguagem diferente, mais adiante, ao longo do decorrer do código (apresentado no anexo 9), atribuiu-se o nome de *evalAngle* a esta fórmula pelo que foi o nome com o qual se identificou este passo.

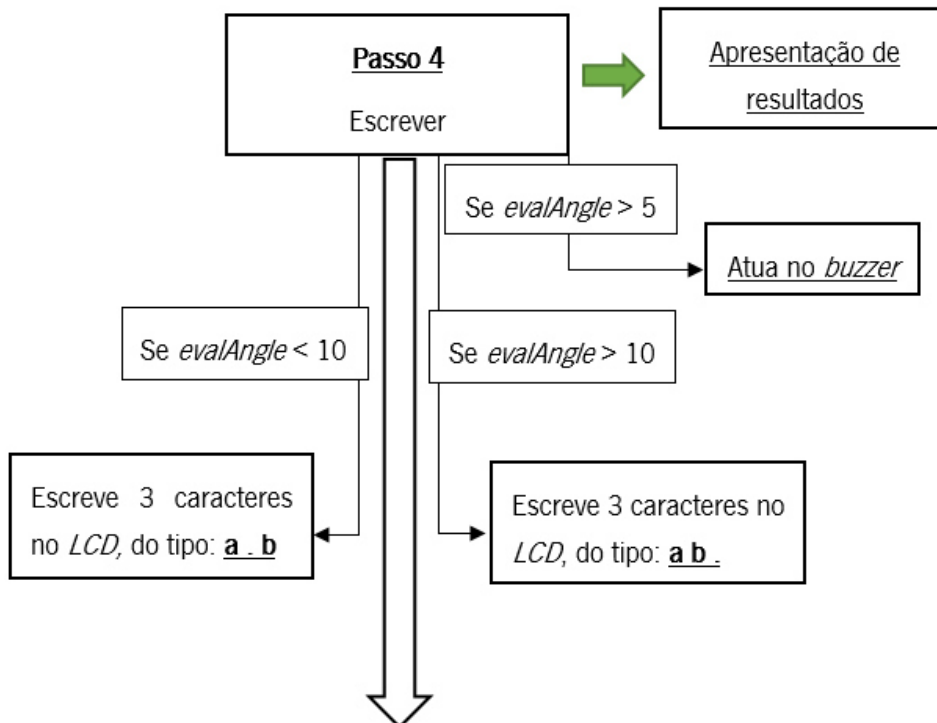


Figura 5.15 Quarto passo do processo de medição

Segue-se o passo 4, esta é a fase onde se escrevem e apresentam os resultados, mediante o valor calculado pela *evalAngle*, como se pode verificar na Figura 5.15. Sendo que este é um sistema simples, não permitia obter valores com um nível de precisão muito elevado pelo que se limitou a apresentar apenas três caracteres, dois números e um ponto.

Assim, quando o ângulo obtido fosse inferior a dez graus o *LCD* apresentava números reais, com uma casa decimal, por exemplo, 5.4, 3.3 entre outros. Caso contrário, ou seja se o valor obtido fosse superior a dez graus, apenas se mostravam dois algarismos, do tipo, 10., 15., entre outros.

Para finalizar este passo, segue-se a comunicação com o último componente deste sistema, o *buzzer*. Para avisar o operador que está perante um valor exagerado de desalinhamento angular, optou-se por utilizar um componente que emitisse um sinal sonoro. Assim, definiu-se que o valor máximo de desalinhamento que uma máquina poderia apresentar era de cinco graus. Sempre que esse valor fosse ultrapassado, era enviada informação para pôr o *buzzer* em funcionamento e este só parava quando a situação voltasse à normalidade.

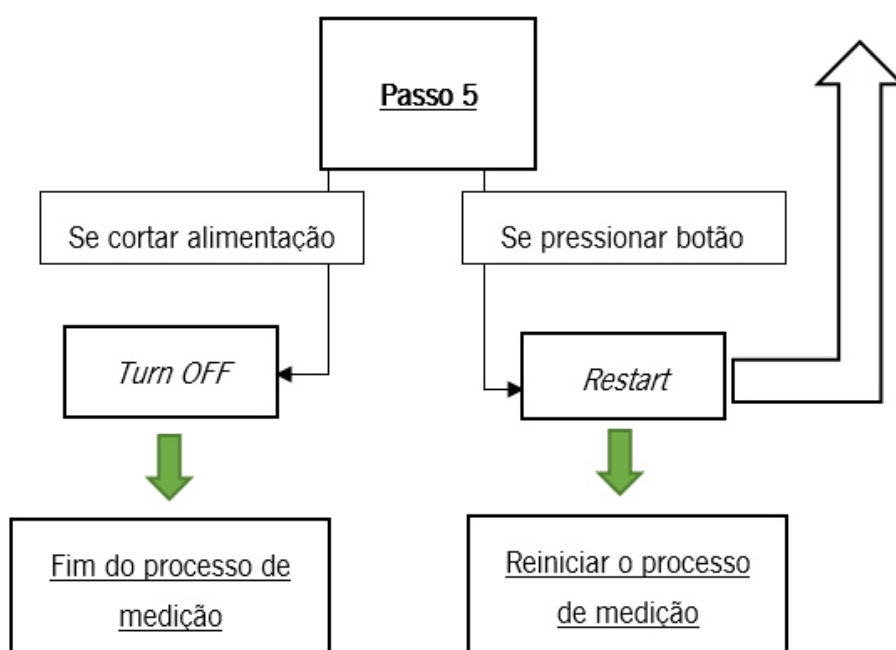


Figura 5.16 Quinto passo do processo de medição

Finalmente, segue-se o passo 5, que representa o fim e o novo início do circuito, apresentado na Figura 5.16. Se por um lado for pretendido terminar o processo de medição, então corta-se a alimentação e com isso desliga-se o dispositivo. Se por outro lado, for do interesse reiniciar ou calibrar o dispositivo, pressiona-se o botão de *reset*. Contudo, havia uma particularidade, quando o botão fosse pressionado, o sistema fazia um *reset* em *loop* durante três segundos. Isto ocorria

a fim de dar tempo ao utilizador, para pôr o dedo e tirar sem que isso alterasse a orientação do dispositivo. Caso o sistema fizesse um *reset* imediato, poder-se-ia estabelecer a posição perfeita sem o ser, pois ao pressionar o botão, introduzia-se uma tensão que iria ser transmitida num deslocamento, aumentando ainda mais o erro do dispositivo.

Concluindo, desenvolveu-se um sistema simples mas que correspondia aos requisitos definidos, sendo possível medir um ângulo e ainda avisando quando se tinha ultrapassado um valor limite. Restava, por último, instalar os sistemas, eletrónico e informático, numa estrutura mecânica, garantindo a posição correta do *IMU* para se obter a maior fiabilidade nas medições.

5.1.3 Sistema mecânico

Em termos físicos este dispositivo terá três partes principais, a caixa e respetiva tampa e uma “braçadeira”. A caixa continha os componentes, a tampa isolava-os e a “braçadeira” permitia a ligação com a máquina de aparafusar.

Para garantir a junção de todos os componentes, foram usados parafusos, primeiro porque estabelecem uma conexão fidedigna e segundo porque o projeto foi desenvolvido numa empresa onde o parafuso é a base de todas as ligações mecânicas.

Assim, tal como foi feito para o sistema eletrónico, começa-se por definir individualmente todos os componentes, seguindo-se uma explicação de como as suas ligações foram estabelecidas e finalmente obtém-se o *assembly* final, criando-se o primeiro dispositivo de perpendicularidade. Visto o primeiro protótipo ter ficado um pouco aquém dos requisitos inicialmente definidos, decidiu-se desenvolver uma nova versão.

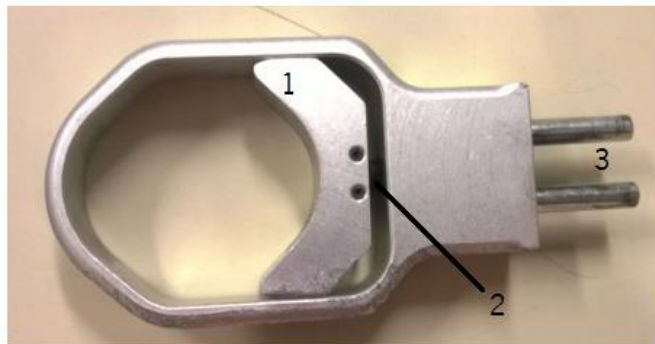
5.1.3.1 “Braçadeira”

Chamou-se “braçadeira” a este componente apenas para dar uma explicação mais concreta do seu funcionamento. O objetivo centrou-se em arranjar uma peça que tivesse a capacidade de “abraçar” e fixar à máquina de aparafusar mas que, por outro lado, tivesse uma base regular capaz de ficar estável, quando pousada numa superfície horizontal. Após grande pesquisa, algumas ideias surgiram, no entanto, a solução encontrada foi bem mais simples.

Todos os *ergo-arms* possuem uma peça que estabelece a ligação com a máquina de aparafusar, garantindo a perpendicularidade entre os dois equipamentos e a sua base era plana, pelo que apresentou ser uma ótima solução. A ligação era estabelecida através do aperto, servindo-se de um parafuso que deslocava linearmente uma “garra” de fixação como se verifica na Figura 5.17. Esta peça foi mais vantajosa do que aparentava, pois possuía uma forma que permitia o encaixe “perfeito” com as máquinas de aparafusar, tornando-se a “chave” da perpendicularidade

que se pretendia alcançar. Assim, se o sistema eletrónico estivesse perpendicular a esta peça, estaria paralelo ao eixo da máquina de aparafusar e esse era o objetivo principal a garantir.

Com isto, ou se construía uma peça igual a esta ou muito semelhante, ou usava-se a peça original. Construir uma peça deste tipo, seria bastante complexo, dado que é uma peça maciça e com uma configuração muito especial, tornando-se um processo muito moroso e dispendioso.



Legenda:

- 1 - "Garra" de fixação
- 2 - Parafuso de aperto
- 3 - Cavilhas de ligação

Figura 5.17 "Braçadeira" original

Desta forma, o assunto foi discutido tanto com o coordenador como com o chefe do departamento e nenhum obstáculo foi posto em usar a peça original, pois estava em *stock*. Houve, contudo, uma alteração a fazer, teve de retirar-se as cavilhas, pois apesar de não serem um obstáculo direto para a realização deste projeto, torná-lo-iam muito menos atrativo e prático.

Através de um torno de bancada fixou-se a peça e recorrendo a uma serra para metal removeram-se as cavilhas. De seguida, limou-se toda a nova superfície de forma a esta ficar plana e alinhada, como se pode verificar na Figura 5.18.



Figura 5.18 "Braçadeira" alterada

A partir deste momento de seleção, deduziu-se que os próximos componentes a desenvolver estariam dependentes desta peça. Assim, teve de haver uma mínima noção de como seriam os componentes seguintes e as ligações a desempenhar.

Pensou-se, então, numa caixa plástica que iria estar acoplada na parte maciça da “braçadeira”, pois era a única parte possível de furar e não intervinha na zona de ligação com a máquina de aparafusar.



Figura 5.19 Zona a realizar o furo para ligação com a caixa

Como já definido, a base do dispositivo teria de ser o mais plana possível para garantir uma maior precisão de calibração, quando em cima de uma estrutura horizontal. Desta forma, pensou-se em usar apenas a base da “braçadeira” e estabelecer a ligação com a caixa ligeiramente acima do plano da sua base, como representado na Figura 5.19. Contudo, ainda não se sabia de forma clara como este processo iria acontecer razão pela qual se optou definir todos os componentes e só depois estabelecer as suas ligações.

Fez-se ainda um modelo em *SolidWorks* para, posteriormente, juntar todas as peças e obter-se um conjunto puramente digital, representado na Figura 5.20. No anexo 1 encontra-se o desenho técnico deste componente.

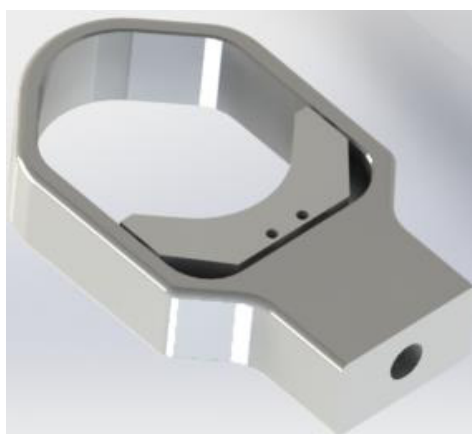


Figura 5.20 “Braçadeira” em formato digital

5.1.3.2 Caixa e tampa

Após a definição e desenvolvimento da “braçadeira” já se sabia a localização para a acoplagem com a caixa mas ainda não tinha sido definido qual seria o aspeto da caixa nem como essa ligação seria efetuada. Isto porque ainda havia mais alguns requisitos a ter em conta. A ideia seria, fazer uma estrutura capaz de encaixar na “braçadeira”, conter o sistema eletrónico e garantir o correto alinhamento entre os dois.

O primeiro passo passou apenas por definir uma forma na qual a caixa ficasse num plano perpendicular ao da “braçadeira”. Desta forma, garantia-se que o sensor eletrónico estava sempre num eixo paralelo ao da máquina de aparafusar.

Com isto, usou-se o programa *SolidWorks* para se construir um esboço que respeitasse tais requisitos. O esboço foi feito sem qualquer cuidado dimensional, apenas servia para ter uma noção de como o dispositivo seria feito. Assumiu-se que a caixa ficaria verticalmente encaixada na “braçadeira” e a ligação entre os dois componentes iria estabelecer-se recorrendo a parafusos. Para tal, criaram-se dois blocos, um representava a caixa e o outro a “braçadeira”, tal como se observa na Figura 5.21.

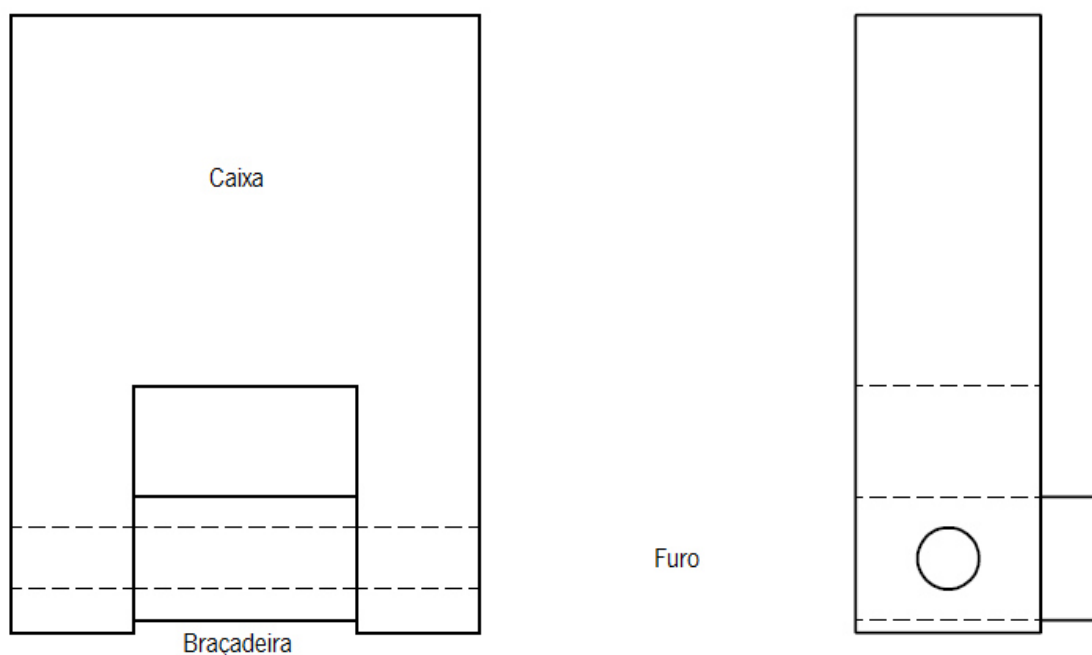


Figura 5.21 Primeira ideia para a caixa

Assim, tinha-se atingido uma solução que respeitava todos os requisitos, era possível estabelecer a ligação com a “braçadeira” como se tinha definido e havia espaço para incluir os componentes eletrónicos. Contudo, havia um problema, a qualidade da ligação. Mesmo com parafusos a estabelecer o aperto entre os componentes, esta solução permitia movimento no eixo

vertical. Caso isso acontecesse, todo o sistema estaria em risco e, por isso, deixava de ser uma solução viável razão pela qual conduziu à definição de um novo esboço.

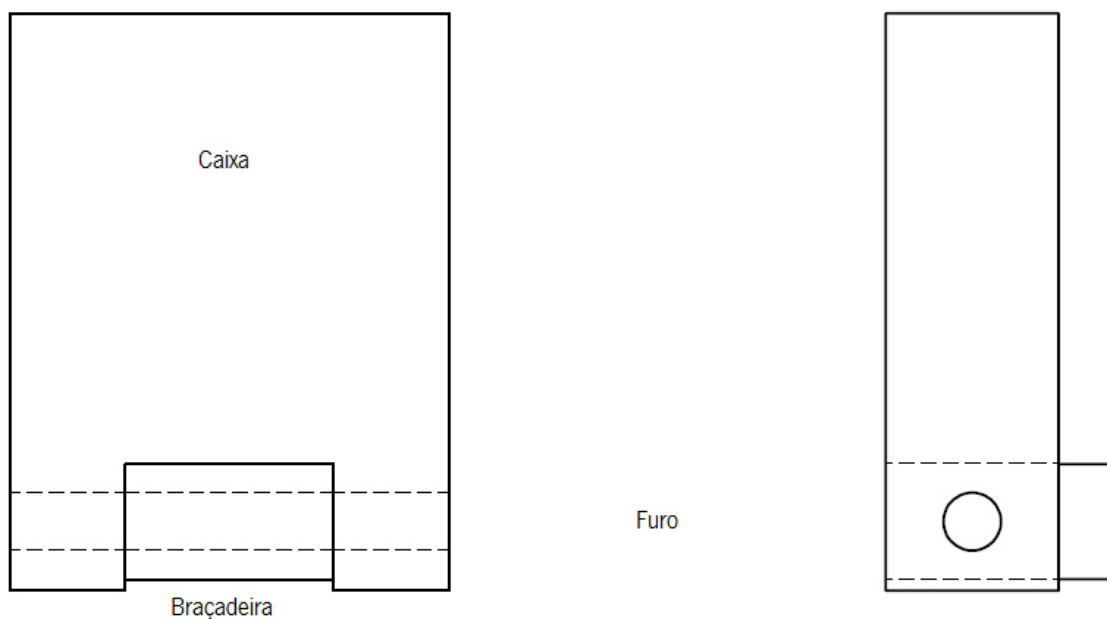
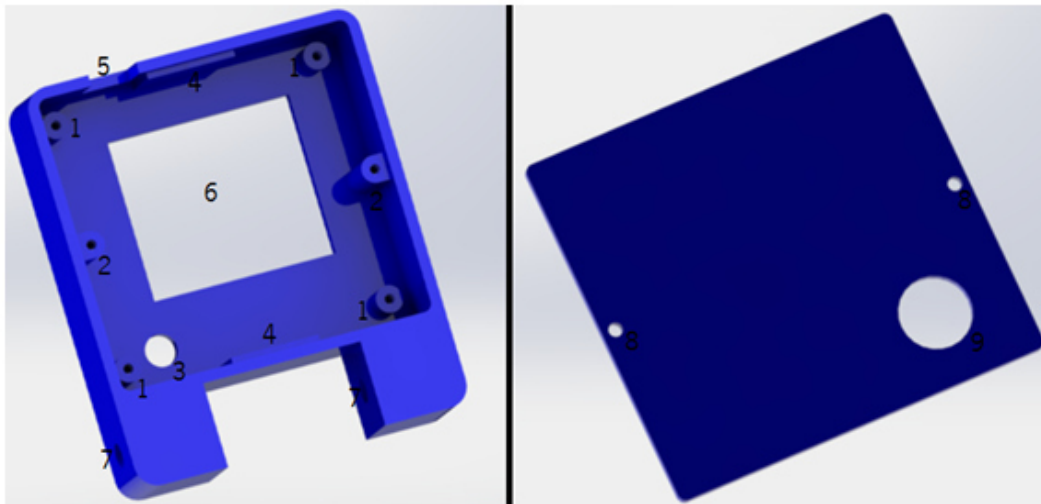


Figura 5.22 Ideia final para a caixa

Esta solução, representada na Figura 5.22, nasceu de um melhoramento da anterior. Tal como a primeira, respeitava todos os requisitos mas reduzia drasticamente a possibilidade de ocorrer qualquer movimento. Isto porque a caixa estaria apoiada e aparafusada na “braçadeira”, garantindo uma ligação bem mais fiável.

Posto isto, atingiu-se a solução final. Sendo apenas necessário transformar o esboço num modelo *SolidWorks* completamente definido. Para se realizar esta transformação, houve a necessidade de atender ao espaço, que o sistema eletrónico ocuparia, onde a tampa estaria localizada e a todas as ligações adjacentes. Visto já ter sido definida a disposição dos componentes eletrónicos apenas foi necessário fazer uma adaptação entre eletrónica e mecânica.

Finalmente, desenvolveu-se o esboço anteriormente apresentado e definiu-se a estrutura final da caixa e da respetiva tampa.



Legenda:

- 1 - *Bosses* para ligação com *PCB*
- 2 - *Bosses* para ligação com tampa
- 3 - Furo para acomodar botão de *reset*
- 4 - "Rebordos" para apoiar a tampa
- 5 - Abertura para entrada *USB* do *Arduino*
- 6 - Abertura para acomodar *LCD*
- 7 - Furo para ligação com "braçadeira"
- 8 - Furos para ligação com caixa
- 9 - Furo para acomodar *buzzer*

Figura 5.23 Caixa e tampa em formato digital e respetiva legenda

Como se observa na Figura 5.23, vários são os pormenores que fazem com que este conjunto respeite todos os requisitos.

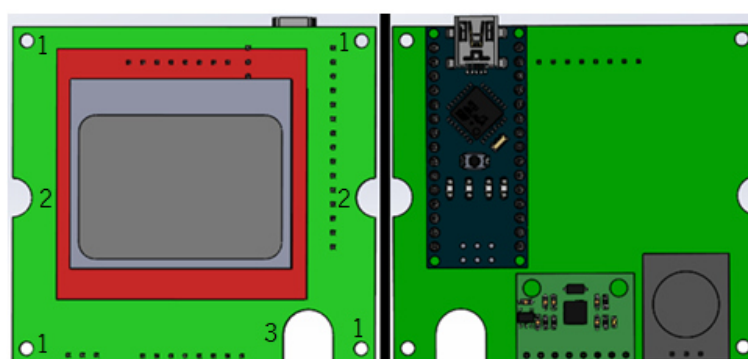
Primeiramente, definiu-se a abertura e o furo para promover o encaixe e aparafusamento com a "braçadeira". Estabeleceu-se que a largura da abertura seria igual à da "braçadeira" garantindo um aperto mínimo entre os dois componentes mas permitindo a acoplagem. A altura da abertura foi feita em concordância com a zona de contacto da "braçadeira", para determinar a correta localização do furo e garantir que a base do dispositivo fosse a base da "braçadeira". Desta forma, seria mais fiável manter a estabilidade da ligação e após ser aparafusada iria alcançar-se a perpendicularidade

No que respeita ao sistema eletrónico, fez-se uma abertura para o *LCD*, criaram-se 4 furos para as ligações com o *PCB* e um outro para passagem do botão de *reset*. Fez-se também uma reentrância para a entrada *USB* do *Arduino*, permitindo tanto a fácil alimentação do dispositivo como uma alteração da programação do mesmo. Todos estes detalhes foram feitos tendo em conta a distribuição dos componentes eletrónicos, com exceção do botão. Para tornar este dispositivo mais apelativo e funcional, definiu-se que o botão estaria localizado abaixo do visor e ligeiramente à direita dele, para facilitar a ligação com a placa *PCB*.

Para permitir a ligação com a tampa, realizaram-se dois outros furos e inseriram-se dois “rebordos” que serviam para apoiar a tampa e reduzir o número de parafusos usados para a fixação.

Apesar de todos estes detalhes terem sido cuidadosamente definidos, não foi dada a mesma importância a todos eles. Posto isto, houve um maior cuidado em estabelecer as ligações do que em acomodar alguns componentes eletrónicos. Tomou-se esta iniciativa porque havia uma maior necessidade em estabelecer ligações com boa qualidade, pois eram a base do funcionamento deste dispositivo. Sendo que ainda não se tinha executado qualquer construção, não fazia sentido discutir estes aspetos dimensionais, pelo que será focado posteriormente. Nos anexos 3 e 4 encontram-se os desenhos técnicos da caixa e tampa, respetivamente.

Como mencionado, para definir a maior parte dos pormenores da caixa, houve uma fase de adaptação, adaptou-se a caixa ao sistema eletrónico. Seguiu-se então uma fase de adaptação inversa, ou seja, adaptar o sistema eletrónico à caixa. Para tal, foi necessário realizar algumas alterações. Deste modo, foi feito um rasgo para permitir a passagem do botão e dois outros para permitir a passagem dos *bosses* laterais da caixa. Optou-se por fazer estes detalhes ligeiramente mais largos do que as partes a receber, botão e *bosses*, para que o *assembly* não ficasse demasiado justo. Finalmente, foram realizados quatro furos passantes e equidistantes para estabelecer a ligação com a superfície da caixa. Para poder definir as distâncias de segurança dos furos em relação às extremidades da peça, recorreu-se a um artigo. Este defendia que, para um aço, a mínima distância de segurança para realizar furos em ficheiros *NC* era de 2 milímetros, caso o valor adotado fosse inferior, não era possível realizar o furo. (Autodesk, 2015) Pesquisou-se um pouco por *NC* e *NC files* e percebeu-se que se tratava de uma extensão de um arquivo que continha instruções para controlar máquinas de corte, como máquinas *CNC*, pelo que era a solução ideal. (WhatIs, 2010) Assim, e para não usar um valor mínimo, adotou-se, arbitrariamente, uma tolerância de 0.25 milímetros, obtendo-se uma distância final de 2.25 milímetros para cada lado. No anexo 2 encontra-se o desenho técnico deste componente.



Legenda:

- 1 - Furos de ligação
- 2 - Rasgos para os *bosses* da tampa
- 3 - Rasgo para o botão

Figura 5.24 Placa *PCB* alterada

Após terem sido realizadas todas as alterações na placa *PCB*, foi possível transformar um desenho em *SolidWorks*, Figura 5.24, num formato real capaz de ser inserido na estrutura da caixa, como se verifica na Figura 5.25.

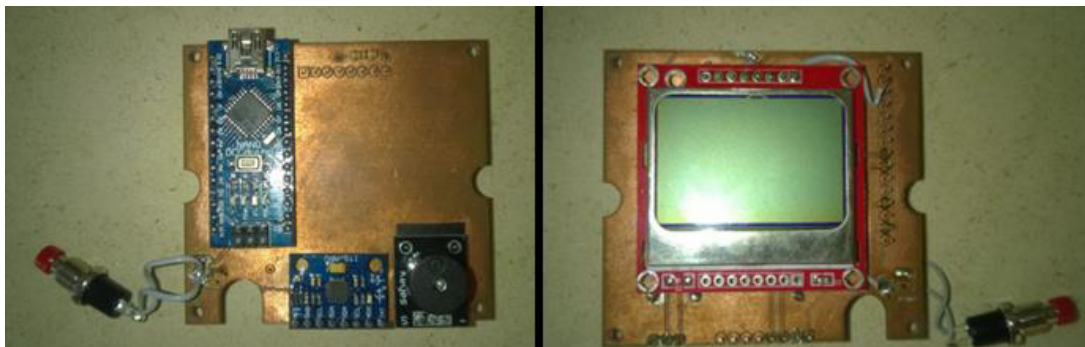


Figura 5.25 Conjunto eletrónico montado

Para que isto fosse possível, adquiriu-se uma placa de cobre e através de uma máquina de corte *CNC*, criou-se uma placa de raiz, com as medidas e os detalhes desejáveis. Todo este processo ocorreu graças à ajuda de profissionais na área da eletrónica.

Tendo os desenhos da estrutura definidos e o sistema eletrónico em funcionamento e em formato real, passou-se à construção da caixa e respetiva tampa. Para construir um modelo real desta estrutura, pensou-se numa impressora *3D*. Primeiro porque se tratava de um conjunto plástico e de pequenas dimensões, segundo porque havia acesso a uma máquina deste tipo. Apesar de conter pormenores com algum detalhe, não havia presença de muitas curvas e superfícies complexas pelo que o fabrico da estrutura não apresentava ser um obstáculo. A impressora usada durante todo o projeto está representada na Figura 5.26.



Figura 5.26 Impressora *3D*

Assim, apenas se converteu o modelo do desenho *SolidWorks* num modelo compatível com o da impressora e importou-se para esta. Ao fim de quatro horas de impressão, obteve-se a primeira parte do dispositivo de perpendicularidade, apresentada na Figura 5.27.



Figura 5.27 Caixa real

Tendo a caixa feita, passou-se à construção da respetiva tampa e seus requisitos, usando mais uma vez as vantagens da impressora *3D*. No entanto, nem tudo correu como se esperava. Ao realizar o *assembly* a reentrância para alimentação do *Arduino* ficava apertada e isto dificultava a entrada de um cabo *USB*. Portanto, houve necessidade de se realizar uma outra alteração.

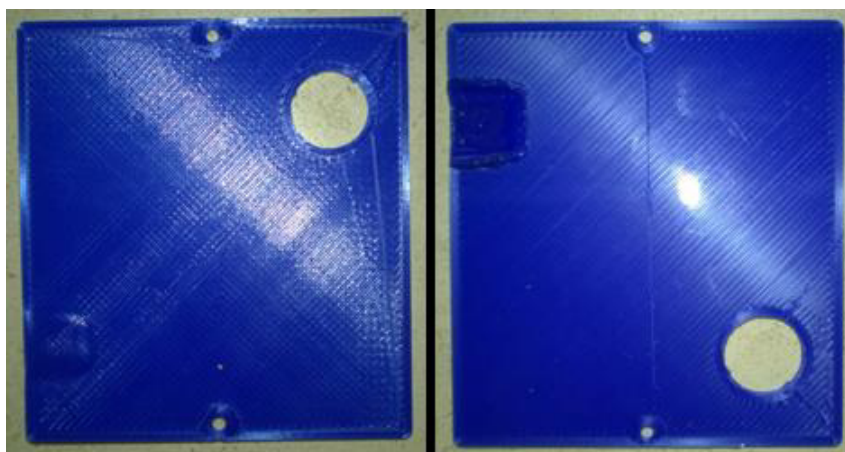


Figura 5.28 Tampa vista de frente e de trás em formato real

Com um ferro de soldar, derreteu-se ligeiramente a secção crítica, tentando ao máximo não danificar a parte exterior para manter o bom aspeto do dispositivo. Feito este processo, deixou de haver qualquer problema e na Figura 5.28 encontra-se a tampa já alterada.

Após todo este processo de fabrico, já se começava a ter uma ideia de como o protótipo ficaria, apenas faltavam estabelecer e executar as suas ligações.

5.1.4 Protótipo1

Tendo a caixa e a tampa construídas e o sistema eletrónico montado, seguia-se a fase de juntar todos estes componentes para dar origem ao primeiro protótipo. Apesar de já ter sido referido como seriam as ligações do conjunto plástico e terem sido feitas várias alterações na “braçadeira” não foi mostrado como tudo iria ficar. Assim, segue-se uma explicação mais detalhada dos aspetos dimensionais que permitiram um *assembly* de boa qualidade e com isto um protótipo fidedigno.

Visto a forma de encaixe entre a caixa e a “braçadeira” ter sido um dos pontos principais para o sucesso deste protótipo vai começar-se por esta conexão.

Esta era uma ligação um pouco mista, por um lado, era estabelecido o aperto entre os componentes e por outro, usavam-se parafusos para o bloqueamento. O primeiro passo passou por garantir o aperto mínimo entre os componentes. Inicialmente, pensou-se em reduzir a abertura da caixa relativamente à largura da “braçadeira” e assim sendo o aperto era garantido. No entanto, tratava-se da ligação entre uma peça mole e uma peça dura onde o risco de rotura era demasiado elevado. Assim, definiu-se que a abertura da caixa fosse exatamente igual à largura da “braçadeira”, permitindo a acoplagem e garantindo um aperto mínimo. Contudo, havia algo mais a considerar. Visto ter-se usado uma impressora 3D havia sempre o risco da peça encolher. Sendo esta uma estrutura de dimensão muito reduzida, havia uma grande necessidade em manter os valores dimensionais estabelecidos pelo que se tentou escolher o material mais adequado para isso. Após uma breve pesquisa, concluiu-se que os filamentos mais comuns usados por impressoras 3D derivavam de dois tipos de material. Assim, havia os *ABS* (*acrylonitrile butadiene styrene*), um material rígido e com alguma flexibilidade e os *PLA* (*Polylactic acid*), um material biodegradável e não tão rígido. No entanto, a principal diferença entre os dois era o fator de encolhimento, nos *ABS* esse fator era de aproximadamente 8% e nos *PLA* de 2%. (Fabbaloo, 2013) Visto apenas haver acesso ao material do tipo *ABS*, não houve hipótese de escolha e esse foi o selecionado. Após a impressão, verificou-se que a peça tinha ligeiramente encolhido. O que sucedeu foi que a zona de abertura ficou sensivelmente mais apertada (menos de meio milímetro), todavia permitia a acoplagem entre os componentes, resultando numa ligação com boa qualidade. Na Figura 5.29, está identificada a secção da ligação até agora discutida, onde também se pode verificar que a base do dispositivo coincide com a base da “braçadeira”, tal como pretendido.

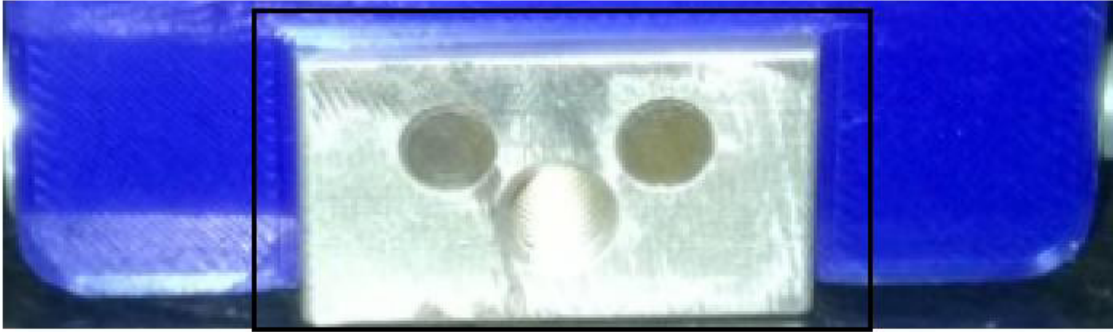


Figura 5.29 Ligação de encaixe entre “braçadeira” e caixa

Segue-se agora a ligação aparafusada. Aquando do desenvolvimento da “braçadeira”, definiu-se que a ligação com a caixa seria feita recorrendo a parafusos. Posto isto, apenas restava seleccionar os parafusos e realizar os respetivos furos na correta posição para mais tarde se efetuar o *assembly*.

Usaram-se dois parafusos M5 do tipo sextavado interno, tendo o corpo parcialmente roscado como se observa na Figura 5.30. Escolheram-se estes parafusos pois havia fácil acesso e apresentavam um diâmetro aceitável tendo em conta a espessura da zona de ligação.



Figura 5.30 Parafusos M5 e respetivas anilhas

O parafuso apresentava uma haste comprida, uma particularidade que lhe garantia a passagem pela caixa. Não havia qualquer interesse em roscar no plástico, pois tratava-se de um material dúctil e oco, havendo um elevado risco de romper a peça. Isto porque tratava-se de uma peça de pequena espessura, onde as tensões geradas durante a roscagem levariam certamente à rotura. Para reduzir ainda mais a possibilidade disto acontecer, recorreu-se a duas anilhas planas para distribuírem uniformemente as tensões pela peça.

Para realizar os furos na “braçadeira”, usou-se uma broca com 3 milímetros de diâmetro, este era o valor tabelado para realizar um furo que se pretendia roscar, permitindo acomodar um parafuso M5 (Morais, 2006). Assim, fizeram-se dois furos cegos de um lado e do outro da “braçadeira” até ligeiramente antes do seu eixo central, com cerca de 10 milímetros, representado por X na Figura 5.31.



Figura 5.31 Representação da profundidade e localização dos furos

Como mencionado, o objetivo desta ligação seria usar dois parafusos para atravessar a caixa e aparafusar na “braçadeira”. Assim sendo, usou-se um macho de 5 milímetros e um líquido de lubrificação e remoção de rebarbas para realizar uma zona roscada perfeita para acomodar o parafuso selecionado, como representado na Figura 5.32.

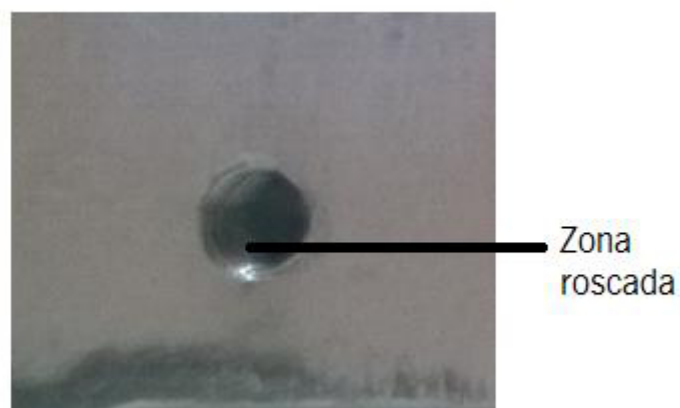


Figura 5.32 Furo roscado para ligação com a caixa

Para a caixa já tudo tinha sido definido aquando do seu *design*, tendo-se seleccionado dois furos passantes de 5.5 milímetros de diâmetro, valor tabelado para um parafuso M5 (Morais, 2006). Este valor era indicado para um aço, bastante diferente do material em questão. Contudo e visto não se ter encontrado muita informação sobre este aspeto, optou-se por não complicar e usar este valor, assumindo que a qualidade da ligação não seria afetada, porque tal como para o aço o objetivo seria atravessar a peça e não roscar nesta.



Figura 5.33 Ligação aparafusada entre “braçadeira” e caixa

Apenas se pensou nesta hipótese de ligação, pois a “braçadeira” possuía um parafuso a meio do seu eixo, pelo que esta era uma zona interdita. Com isto, não seria possível furar a peça de lado a lado e sendo o parafuso o meio escolhido para a ligação, pensou-se em usar dois parafusos ao invés de usar o conjunto de um parafuso e uma porca. Assim, gerou-se uma ligação de boa qualidade, como se observa na Figura 5.33.

Em relação aos restantes furos para ligações mecânicas, havia alguns aspetos dimensionais a ser discutidos, nomeadamente a localização e as suas dimensões.

Tanto para ligar o *PCB* como para ligar a tampa, optou-se primeiro por seleccionar o tipo de parafusos a usar para mais tarde definir as suas ligações, tal como foi feito para a “braçadeira”. Assim, optou-se por usar seis parafusos autorroscantes *PT® M2.2x7*, isto é, com diâmetro de 2.2 milímetros e com 7 milímetros de comprimento, apresentados na Figura 5.34.



Figura 5.34 Parafusos *PT® M2.2x7*

Escolheu-se este tipo de parafuso pois era um dos mais usados na empresa para estabelecer ligações em materiais plásticos. O acionamento não era muito comum, do tipo *TORX®*, no entanto, havia acesso direto a *bits* desta forma pelo que não apresentava ser uma limitação. A ação *thread-forming* que este parafuso apresentava era adequada, pois era ideal para plásticos e além disso não criava muitos detritos e não danificava muito o material.

Em termos da disposição dos furos, a ideia centrou-se em garantir que as distâncias entre eles e as paredes eram equidistantes, forma simples de atingir uma boa resistência mecânica. Assim, para o *PCB*, optou-se por espalhar os furos pelos quatro cantos da superfície da caixa, a uma distância arbitrária de 5 milímetros, considerada segura.

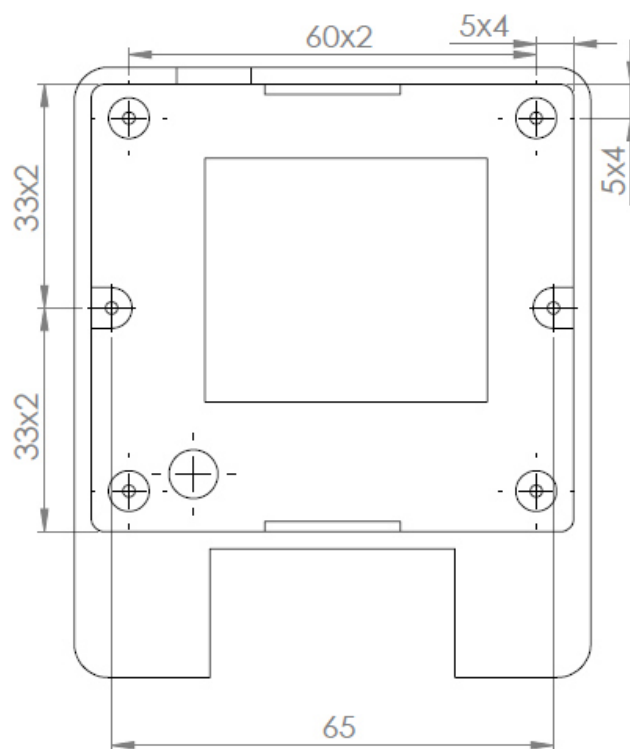


Figura 5.35 Disposição dos furos do *PCB* e da tampa

O mesmo foi feito para os furos da tampa, localizando-se a meia distância da altura da caixa, como se observa na Figura 5.35, contudo a sua geometria variou consideravelmente.

Para conseguir estabelecer todos os aspetos dimensionais dos furos, seguiram-se as fórmulas de um catálogo para ligadores de plástico. Não foi possível usar as fórmulas específicas para os parafusos *PT®* pois estavam incompletas. Desta forma, optou-se por seleccionar aquelas usadas para os *Delta PT®*, um parafuso que nasceu de uma melhoria dos *PT®* pelo que são muito

semelhantes, algo que se pôde verificar nos valores aplicados nas suas fórmulas. (Stanley Engineered Fastening, 2015)

Começou-se, então, por estabelecer todos os cálculos para a ligação entre caixa e *PCB* para de seguida introduzir-se a ligação entre a caixa e a tampa. A grande diferença era que para permitir a ligação entre caixa e *PCB* foram usados furos cegos e para a restante ligação, furos passantes.

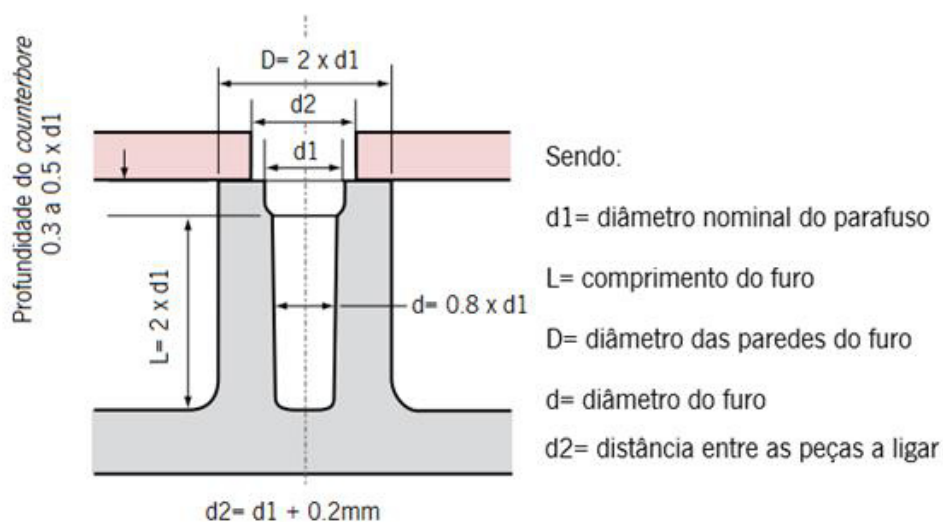
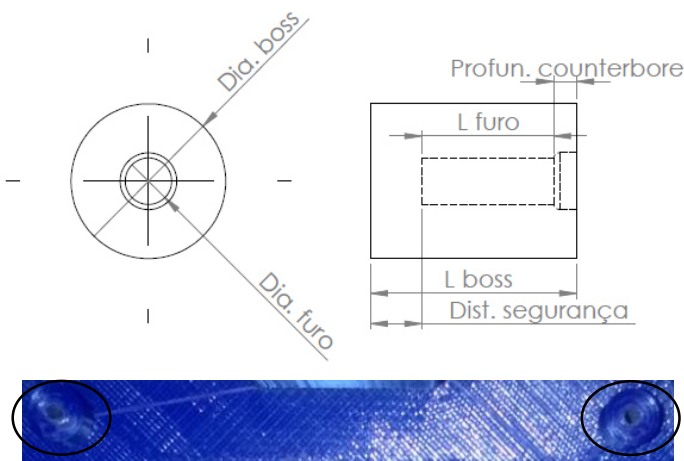


Figura 5.36 Representação dos aspetos dimensionais para parafusos *PT@* (Stanley Engineered Fastening, 2015)

Como se observa na Figura 5.36, foi possível determinar todos os aspetos principais da ligação entre *PCB* e caixa: profundidade do furo, diâmetro do furo, distância máxima entre as peças a ligar, diâmetro do *boss* e *counterbore*. As três primeiras características são fáceis de entender pelo que não fazia sentido explicá-las, contudo, o mesmo não se passava com as duas últimas. Assim, *boss* ou *boss hole* representa uma adição de material feita para acomodar furos em materiais plásticos, com vista a fornecer resistência mecânica suficiente para a ligação ocorrer. Por outro lado, tem-se o *counterbore* que neste caso não servia para que a cabeça do parafuso assentasse naquela zona, servia antes para permitir a entrada do parafuso. Sendo que se trata de um parafuso autorroscante, o furo tem de ser mais estreito que o diâmetro nominal do parafuso para permitir que este crie a sua própria rosca. Todavia, tem de haver algo que permita a entrada do parafuso no furo, daí haver um *counterbore*, uma zona mais larga que permitia iniciar o processo de aparafusamento. Apesar de haver um estudo de todas as características do furo, não se considerou a peça que se estaria a ligar, pois o catálogo em que se basearam estes cálculos não tinha isso em conta. Visto que o *PCB* apresentava uma espessura muito reduzida, de 1.6 milímetros, admitiu-se que nenhum problema daí adviria.

Após a obtenção da solução de todas as fórmulas, optou-se por adotar alguns valores e alterar outros, como se vê na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Dimensões usadas para os *bosses* e furos do *PCB*

| Parafuso M2.2x7 <i>PT®</i> | | |
|---|------------------------|---------------------------|
| Características dos <i>bosses</i> para o <i>PCB</i> | Dimensões obtidas (mm) | Dimensões escolhidas (mm) |
|  | | |
| Diâmetro do furo (Dia. furo) | 1.76 | 1.8 |
| Comprimento do furo (L furo) | 4.4 | 5.1 |
| Profundidade do <i>counterbore</i> (Profun. counterbore) | 0.88 | 0.9 |
| Distância máxima entre as peças a ligar | 2.4 | 0 |
| Altura do <i>boss</i> (L boss) | - | 8 |
| Diâmetro do <i>boss</i> (Dia. boss) | 4.4 | 6 |
| Distância de segurança (Dist. segurança) | - | 2 |

Apesar de se terem alterado alguns valores calculados, havia certos parâmetros que necessitavam de se manter iguais, tais como o diâmetro do furo e a profundidade do *counterbore*. Isto porque se tratava de elementos específicos para este tipo de ligador e fundamentais para a fiabilidade da ligação. Assim, optou-se apenas por arredondar os seus valores às unidades, visto que também já se contava com alguma contração da peça após o seu fabrico.

Por outro lado, houve valores que foram bastante alterados, como o diâmetro, a profundidade do furo e a altura do *boss*. Estes em nada condicionavam o funcionamento da ligação, apenas aumentavam a resistência da mesma, pois forneciam mais espaço para o parafuso criar rosca e mais espaço para ele penetrar na peça. Finalmente, havia a distância máxima a que as peças poderiam estar uma da outra durante a ligação. Este era um parâmetro que apenas limitava as ligações, não permitindo que duas peças estivessem muito afastadas uma da outra. No entanto, para este caso não havia qualquer necessidade de isso acontecer pelo que foi decidido que as peças estariam coincidentes, sendo esse valor nulo. Finalmente, definiu-se uma nova variável,

uma distância de segurança, esta permitia garantir que caso o parafuso atravessasse os limites do furo, nunca danificaria a espessura da peça. Estabeleceu-se, arbitrariamente, 2 milímetros como uma espessura suficiente para superar este problema.

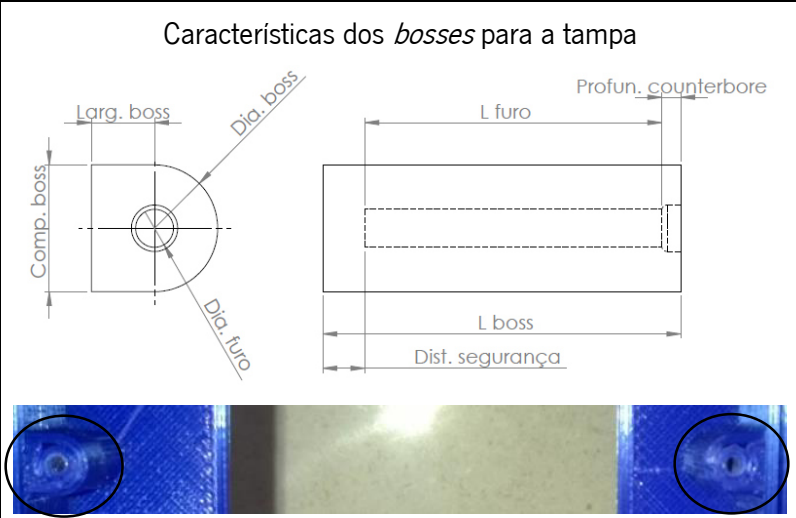
Posto isto, obteve-se uma ligação bastante aceitável e para dar uma ideia mais visual, na Figura 5.37, encontram-se as ligações já estabelecidas em formato real.



Figura 5.37 Ligações entre *PCB* e caixa, na parte superior (em cima) e na parte inferior da caixa (em baixo)

No caso dos furos para receber a tampa fez-se exatamente o mesmo, contudo a geometria usada para os *bosses* variou um pouco. Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores obtidos e adotados, referentes a todos os aspetos dimensionais.

Tabela 5.4 Dimensões usadas para os *bosses* e furos da tampa

| Parafuso M2.2x7 PT® | | |
|--|------------------------|---------------------------|
| Características dos <i>bosses</i> para a tampa  | Dimensões obtidas (mm) | Dimensões escolhidas (mm) |
| Diâmetro do furo (Dia. furo) | 1.76 | 1.8 |
| Comprimento do furo (L furo) | 4.4 | 10.35 |
| Profundidade do <i>counterbore</i> (Profun. counterbore) | 0.88 | 0.9 |
| Distância máxima entre as peças a ligar | 2.4 | 0 |
| Altura do <i>boss</i> (L boss) | - | 15 |
| Largura do <i>boss</i> (Larg. boss) | - | 3.4 |
| Comprimento do <i>boss</i> (Comp. boss) | - | 6 |
| Diâmetro do <i>boss</i> (Dia. boss) | 4.4 | 6 |
| Distância de segurança (Dist. segurança) | - | 3.75 |

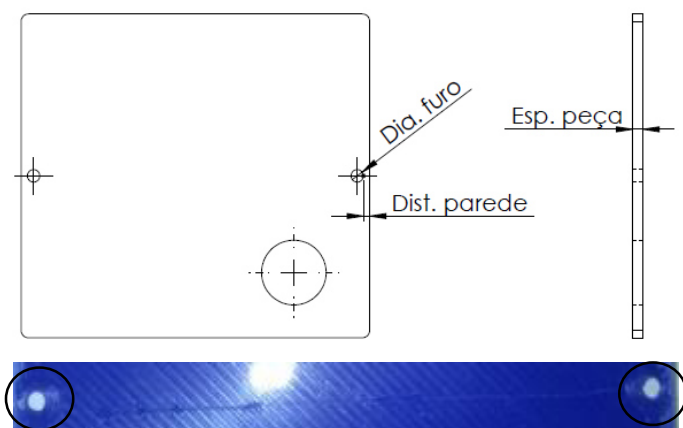
Visto ter-se assumido que a tampa seria aparafusada nas laterais da caixa, havia duas hipóteses para a construção dos novos *bosses*. Portanto, ou construir-se-iam ligeiramente afastados das paredes da caixa, como feito para o *PCB*, ou anexar-se-iam às mesmas. Optou-se pela segunda hipótese, pois fornecia uma maior resistência mecânica à ligação e à caixa. Assim, seria feito um novo tipo de *boss hole*, bastante diferente daqueles feitos para o *PCB*, apresentando comprimento e largura. O comprimento teria de ser coincidente com o diâmetro pelo que tal como para o *PCB* optou-se por aumentar esta medida para 6 milímetros. A largura foi um parâmetro arbitrário, pelo que se atribuiu 3.4 milímetros, valor ligeiramente superior à espessura geral da peça. Em relação aos restantes aspetos dimensionais, definiu-se que tudo seria igual ao que foi feito para os *bosses* anteriores, pois os parafusos eram os mesmos. O único parâmetro que variou drasticamente foi a altura. Realizou-se uma adição de material bastante superior, isto porque a

tampa ficaria consideravelmente distanciada da zona do furo. Assim, ou se aumentava na espessura do furo ou selecionava-se um parafuso diferente e bastante comprido. Visto ser bem mais prático usar o mesmo tipo de parafuso, optou-se por aumentar a espessura do respetivo furo.

Ainda relativo a esta ligação têm-se os “rebordos”. Estes foram feitos tendo em consideração os *bosses* da tampa e por isso possuíam uma altura igual. Com isto, é possível ter-se uma ligação fidedigna, apoiada na vertical e aparafusada nas laterais.

Para concluir a ligação entre a tampa e a caixa faltava apenas realizar os furos na tampa correspondentes. Estes furos são passantes, pois o objetivo é atravessar a tampa e apertar nos furos da caixa. Visto no livro anteriormente utilizado não estar tabelado o valor do diâmetro que os furos deveriam ter, recorreu-se a uma nova referência para obter o que se pretendia. Mais uma vez não foi possível encontrar informação específica para o material usado, todavia verificou-se que mesmo para materiais diferentes o diâmetro era constante pelo que se tomou este valor como correto. Assim, definiu-se que o diâmetro do furo passante teria de ser 1.06 vezes o diâmetro nominal do parafuso. (Portal Met@alica, 2008) Na Tabela 5.5 apresentam-se os valores adotados, referentes aos aspetos dimensionais deste componente.

Tabela 5.5 Dimensões usadas para os furos passantes da tampa

| <p>Características dos furos passantes da tampa</p>  | <p>Dimensões escolhidas (mm)</p> |
|--|----------------------------------|
| <p>Diâmetro do furo (Dia. furo)</p> | <p>2.3</p> |
| <p>Distância à extremidade da peça (Dist. parede)</p> | <p>2.25</p> |
| <p>Espessura da peça (Esp. peça)</p> | <p>2</p> |

Com isto, o parafuso deslizava através da tampa mas ficava “sentado” na sua superfície. Em termos de distanciamento à extremidade da peça, fez-se o mesmo que no *PCB*, admitindo uma distância de 2.25 milímetros. Tal como foi feito para caixa e *PCB*, recorreu-se a uma foto para mostrar esta nova ligação, representada na Figura 5.38.

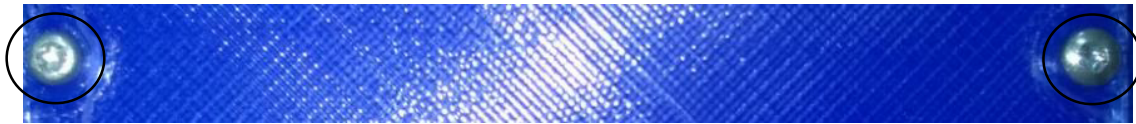


Figura 5.38 Ligação aparafusada entre tampa e caixa

Após todas as ligações terem sido cuidadosamente definidas, promoveu-se a montagem e sendo que inicialmente tinha sido feito um projeto em *SolidWorks*, optou-se por mostrar ambas as versões, a digital, representada na Figura 5.39 e a real, representada na Figura 5.40. No anexo 6 encontra-se o desenho de catálogo deste protótipo.

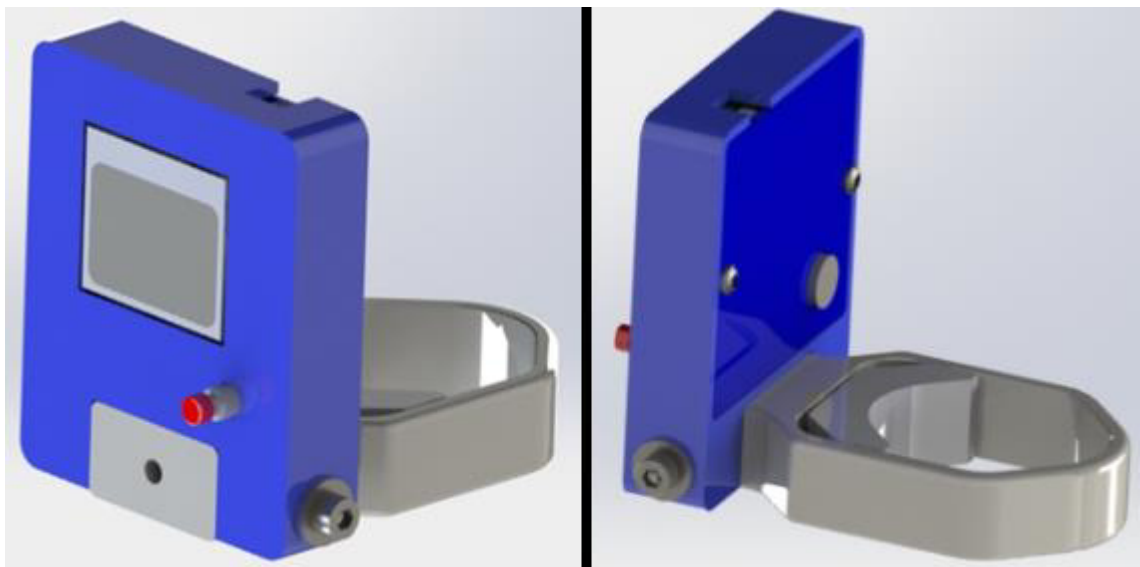


Figura 5.39 Protótipo em formato digital

Como se pode ver, trata-se de um dispositivo de pequeno porte tornando-se bastante útil para obter medições de todas as máquinas de aparafusar durante uma paragem de produção, como por exemplo, na hora do almoço ou em troca de turno.



Figura 5.40 Protótipo em formato real

Assim, obteve-se a solução para o problema, todavia apresentava um claro obstáculo, não era muito prático. Para se alimentar este dispositivo, teria de haver sempre um cabo com entrada *USB* com dimensão suficientemente grande para chegar a uma tomada ou usar uma extensão. Neste caso, optou-se por usar um cabo *USB* macho/fêmea bastante comprido e o cabo *USB* mini que vinha com o *Arduino Nano* aquando do processo da sua compra, apresentados na Figura 5.41.



Figura 5.41 Cabo *USB* macho/fêmea (à esquerda) e cabo *USB* mini (à direita)

Este conjunto era o ideal, a entrada mini ligava-se ao dispositivo e a entrada macho ligava-se à entrada fêmea do cabo comprido e esta por sua vez ligava-se a um transformador, assim estabelecia-se a alimentação deste protótipo. Visto o cabo *USB* macho/fêmea ser bastante comprido, cerca de 6 metros, permitia alcançar vários postos de trabalho, o que se tornou uma grande vantagem.

O maior problema seria que mesmo com esta solução ou com uma extensão não seria possível obter medições de postos de linhas diferentes. A solução seria trocar constantemente de tomada consoante a distância estabelecida ou usava-se uma extensão de grandes dimensões.

Em suma, este protótipo garantia a medição que se pretendia, para qualquer máquina de aparafusar e equipamentos adjacentes, todavia não era o meio mais útil para o fazer.

5.1.5 Protótipo 2

Partindo do protótipo inicial e da sua limitação, passou-se à descoberta de uma melhor solução, ou pelo menos a mais viável. Sendo que o problema residia em alimentar o dispositivo, então teria de se introduzir uma fonte de alimentação mais próxima dele. Assim, pensou-se numa pilha, um componente pequeno e capaz de fornecer alimentação suficiente.

O principal objetivo centrou-se em usar a mesma caixa mas com uma pilha no seu interior, tornando-se um equipamento completamente portátil. Sendo que o *Arduino* funcionava com valores de tensão compreendidos entre 7 e 12 *volts*, o ideal seria usar uma pilha quadrada de 9 *volts*. Desta forma, afastava-se da complexidade e confusão dos cabos que o original mantinha. No entanto, para garantir a funcionalidade deste novo *upgrade* era necessária a presença de um interruptor do tipo *ON/OFF* para ligar e desligar o dispositivo sempre que necessário. Portanto, optou-se por adquirir um, como o representado na Figura 5.42.



Figura 5.42 Interruptor do tipo *ON/OFF*

Além disso, era necessário adaptar o circuito feito para o primeiro protótipo, pois iriam adicionar-se dois novos componentes, uma pilha e um interruptor. Como se vê na Figura 5.43, apenas foi necessário garantir que a pilha alimentava o circuito e que o interruptor enviasse um sinal ao *Arduino* para ligar e desligar o sistema. Não se perdeu muito tempo em tentar encontrar componentes eletrónicos que fossem iguais aos usados, o que interessava era estabelecer as corretas ligações independentemente do aspeto do conjunto.

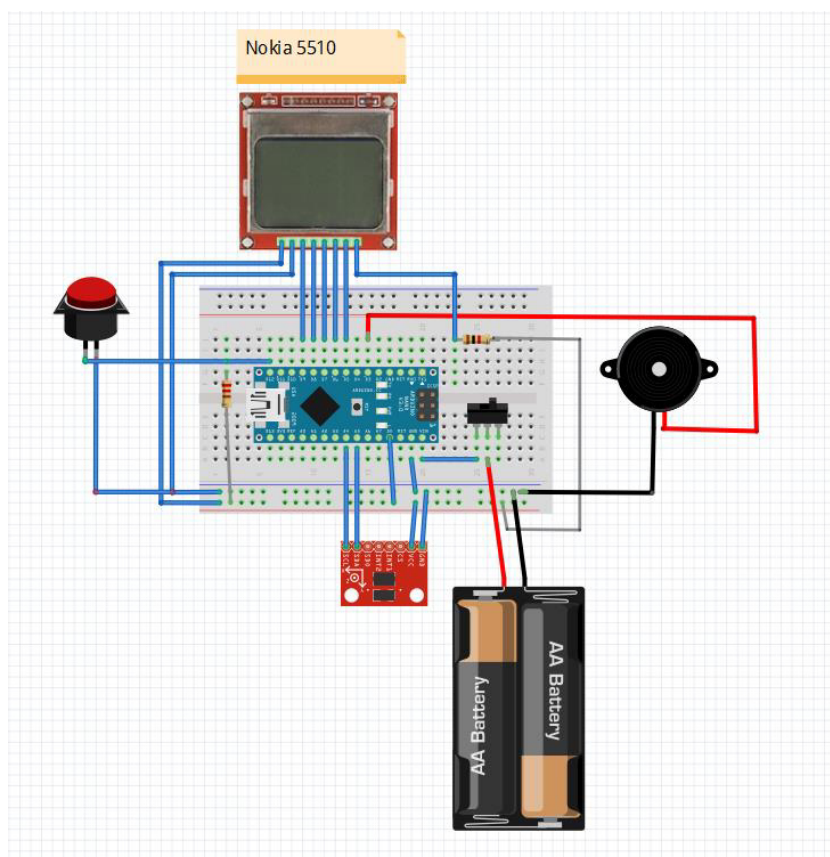
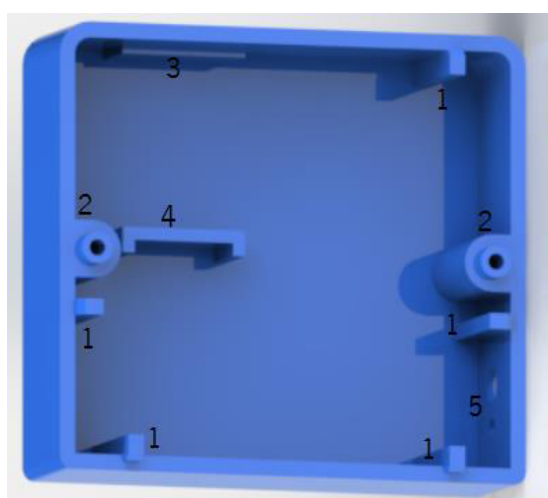


Figura 5.43 Circuito eletrônico para o segundo protótipo

Tendo as novas ligações estabelecidas passou-se à adaptação do protótipo original. Assim, apenas se fizeram algumas alterações na tampa, ou melhor desenhou-se uma nova tampa que fosse capaz de acomodar a pilha e garantir todos os requisitos iniciais, apresentada na Figura 5.44.



Legenda:

- 1 - *Ribs* para resistência estrutural e alinhamento
- 2 - *Bosses* para ligação com a caixa
- 3 - Apoio simples para a pilha
- 4 - Apoio em "L" para a pilha
- 5 - Furos para o interruptor

Figura 5.44 Tampa nova e respetiva legenda

Como se verifica na Figura 5.44, esta nova solução era mais larga e mais robusta do que a inicial fornecendo maior espaço para instalar a pilha e maior resistência mecânica ao conjunto. Havia por isso várias alterações relativamente à primeira tampa, inserção de *ribs*, apoios para a pilha e novos furos.

As *ribs* são reentrâncias, adições de material, propositadas para servir de reforço mecânico. Os apoios são também adições de material que servem para, por um lado, apoiar a pilha garantindo a limitação dos seus movimentos e, por outro, aumentar a resistência mecânica desta ligação e de toda a estrutura da tampa.

Assim, como apresentado na Figura 5.45, as reentrâncias a, b, c, d, e, são exclusivas para reforço estrutural e alinhamento e as 1 e 2 representam os apoios para a pilha.

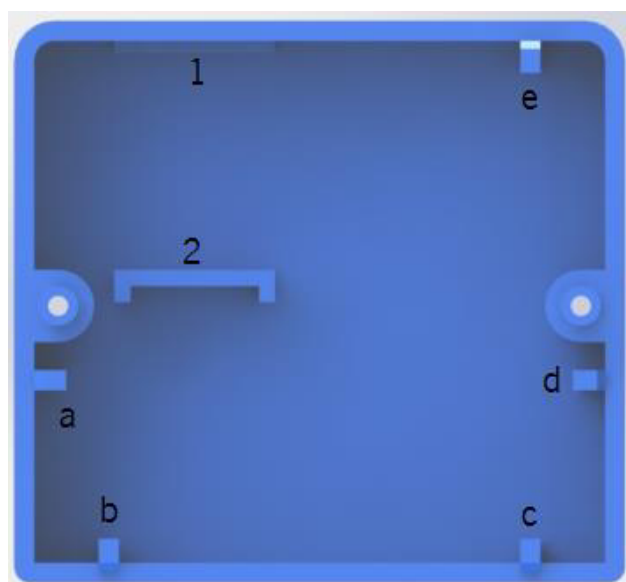


Figura 5.45 Reforços da nova tampa

Começa-se então por fazer uma análise às *ribs* para de seguida definir os restantes reforços e alterações.

Para a espessura das *ribs*, era sabido que se podia reduzir até 0.05 milímetros em relação à espessura da estrutura. (Stratasys Direct Manufacturing, 2015) Contudo, e mais uma vez, para garantir uma boa resistência mecânica optou-se por usar a mesma espessura, de 2.5 milímetros.

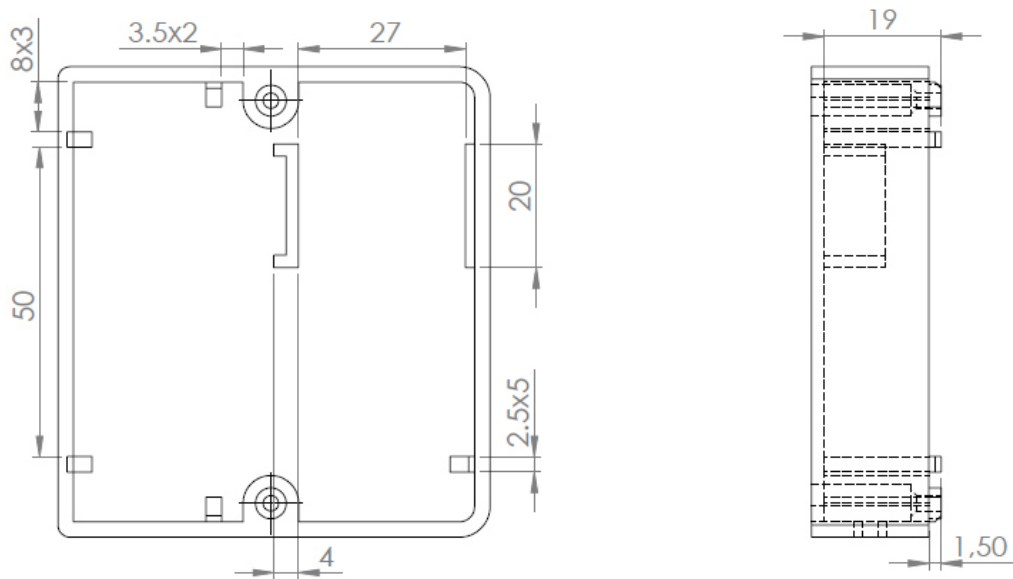


Figura 5.46 Disposição e dimensões dos reforços

Em termos de disposição, optou-se por distribuir estes reforços pelas faces da estrutura e de forma equidistante, tal como foi feito para os furos no primeiro protótipo, como se verifica na Figura 5.46. Assim, colocaram-se duas *ribs* numa face e apenas uma na face oposta, isto porque na face oposta já havia a presença dos apoios para a pilha pelo que não era imprescindível. Além disso, sabia-se que era necessário ter reforços perto dos furos, de forma a dar maior resistência a essa zona. Posto isto, colocou-se um reforço ao lado de cada furo e mais uma vez a uma distância equidistante.

Finalmente, definiu-se a altura, esta foi uma característica que não foi propositada para fornecer maior resistência mecânica mas sim o correto alinhamento entre as peças. Para tal, considerou-se que a altura das *ribs* teria de ser ligeiramente superior à da respetiva tampa, assim estas funcionavam como batentes, garantindo um alinhamento e fácil encaixe entre tampa e caixa.

No que respeita aos reforços da pilha, a ideia seria realizar duas adições de material para acomodar a mesma. Assim, realizaram-se dois apoios, de um lado e de outro da pilha, como representados na Figura 5.47. O apoio situado do lado da parede fez-se com o objetivo de limitar espaço e aumentar a resistência da estrutura. O segundo apoio também era um limitador de espaço mas tinha um formato diferente, um formato em “L”, esta característica fornecia uma maior resistência para a sustentação da pilha.

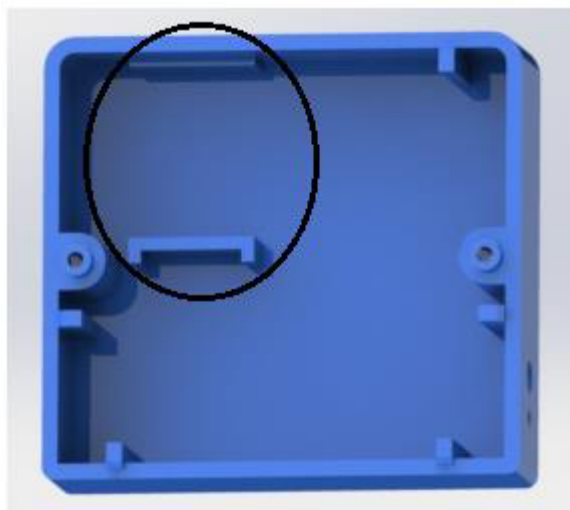


Figura 5.47 Reforços e suportes da pilha

No entanto, estes detalhes apenas limitavam os movimentos da pilha, não sendo suficientes para bloqueá-la numa posição fixa, como se verifica na Figura 5.48.



Figura 5.48 Tampa em formato real e pilha de 9V

Para resolver esta situação e para garantir uma limitação completa de movimentos, optou-se por estabelecer uma nova ligação entre a pilha e a tampa, usando para tal um adesivo. Esta foi uma ação necessária, tinha-se de garantir o bloqueamento total da pilha, pois caso contrário, podia ocorrer a danificação dos componentes eletrónicos, pondo em causa a funcionalidade de todo o projeto. Como se observa na Figura 5.49, este adesivo era um pouco especial pois permitia colar em ambas as superfícies.



Figura 5.49 Adesivo de colagem bilateral

Assim, era possível estabelecer uma ligação entre os dois componentes e com isso garantir uma limitação aos movimentos da pilha, protegendo todo o sistema eletrónico, como se observa na Figura 5.50.

Finalmente, resta explicar como foram definidos os furos. Havia três tipos de furos, os furos que permitiam acomodar o interruptor, os furos de passagem que serviam de guias e os furos de ligação que eram responsáveis por garantir o alinhamento e o *assembly* final.

Para acomodar o interruptor foram feitos dois furos, um permitia o encaixe do interruptor e o outro, bem mais pequeno, permitia o encaixe do detalhe da anilha. Contudo, após montagem, apercebeu-se que não havia muito espaço para a porca apertar pelo que se optou por retirar a anilha. Assim, o interruptor atravessava o furo maior e o furo mais pequeno não desempenhava qualquer ação, como se verifica na Figura 5.50.



Figura 5.50 Pilha fixa com adesivo e furos para o interruptor

Para estabelecer as ligações entre os furos da tampa e os da caixa foram usados novos parafusos. Selecionaram-se dois parafusos $M1.95 \times 12$, representados na Figura 5.51, também do tipo *PT®* mas ligeiramente mais compridos do que aqueles usados para o primeiro protótipo. Por facilidade de aperto, optou-se por usar parafusos maiores.



Figura 5.51 Parafusos $M1.95 \times 12$

Para acomodar os furos de passagem e de ligação foram realizados *bosses*, tal como os que foram feitos na caixa do primeiro protótipo. No entanto, apesar de se terem utilizado os dois tipos de geometria anteriormente usada definiu-se uma disposição diferente. Assim, optou-se por ter um *boss* em “cima” do outro. Um era responsável por acomodar o furo de passagem e parte do furo de ligação, apelidando-se de *boss* de passagem e o outro garantia o alinhamento entre os parafusos e os furos da caixa, apelidando-se de *boss* de ligação.

No entanto, estes novos *bosses* apresentam tamanhos diferentes, os de passagem são sensivelmente maiores, isto porque acomodam furos maiores, os furos de passagem. Os *bosses* de ligação são menores, pois acomodam parafusos menores, com diâmetro nominal de 1.95 milímetros ao invés dos anteriores, com 2.2 milímetros. Assim, optou-se por realizar um dimensionamento semelhante ao anterior, contudo a maioria dos valores usados foram escolhidos consoante as necessidades impostas.

Para os *bosses*, admitiu-se a mesma fórmula usada aquando do primeiro protótipo, onde o seu diâmetro teria de ser 2 vezes o diâmetro nominal do parafuso. Contudo, optou-se, tal como já tinha sido feito, alterar ligeiramente estes valores com vista a aumentar a resistência mecânica. Para os *bosses* de ligação, optou-se por aumentar o valor obtido de 3.9 milímetros para 5 milímetros, para os *bosses* de passagem optou-se por manter o valor calculado. Isto porque neste caso o cálculo fez-se de forma diferente, em vez de se multiplicar 2 vezes o diâmetro do parafuso multiplicou-se pelo diâmetro do respetivo furo. Estabeleceu-se este cálculo porque neste caso não havia um furo passante, havia um furo de “passagem” pelo que o objetivo do *boss* era garantir resistência suficiente para acomodar este furo. Sendo que se optou

por ter um diâmetro de furo de 6 milímetros, definiu-se 12 milímetros para o do respetivo *boss*. Em termos de comprimento, largura e diâmetro, usaram-se valores arbitrários. Optou-se por manter a mesma largura de 3.4 milímetros mas aumentar ligeiramente o diâmetro e comprimento, isto porque, como mencionado, os furos que estes novos *bosses* acomodavam eram também maiores. A altura estabelecida para os *bosses* foi também um parâmetro arbitrário. Para os de passagem definiu-se que a sua altura seria coincidente com a da estrutura da tampa pois o parafuso iria percorrer toda essa zona, para os de ligação assumiu-se uma altura correspondente à das *ribs* para garantir o contacto entre os furos da tampa e os da caixa, tornando mais simples o *assembly* final.

Para os furos, o dimensionamento foi feito de forma semelhante. Os furos de passagem possuíam um diâmetro maior do que a cabeça dos parafusos de forma a permitir que estes deslizassem ao longo do furo mas que mantivessem o alinhamento. Tal como para os furos passantes da tampa do primeiro protótipo, os furos de ligação possuíam um diâmetro 1.06 vezes o diâmetro nominal do parafuso, garantindo que o parafuso ficava sentado neste furo e alinhado com o furo da caixa. Em termos de comprimento dos furos, o objetivo centrou-se em garantir que mais de metade do parafuso ficasse roscado na caixa, e o resto embutido no *boss* para garantir o alinhamento. Desta forma, selecionou-se 4 milímetros de comprimento para o furo de ligação, sobrando ainda 8 milímetros para roscar na caixa, o que era suficiente para garantir uma boa ligação. Nas Tabela 5.6 e Tabela 5.7 estão apresentados todos os valores, calculados e selecionados, que dizem respeito aos aspetos dimensionais deste novo componente.

Tabela 5.6 Dimensões dos *bosses* e furos da nova tampa (parte 1)

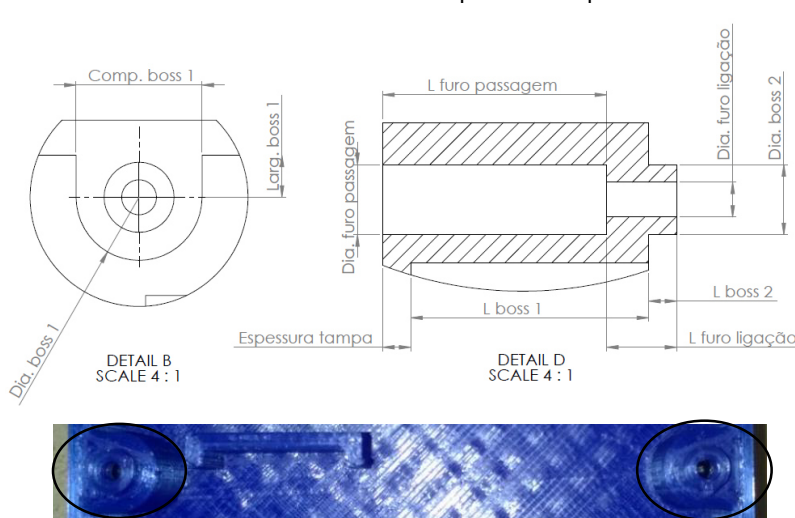
| <p style="text-align: center;">Características dos <i>bosses</i> para a tampa nova</p>  <p>The technical drawing shows a cross-section of a boss with various dimensions labeled: 'Comp. boss 1', 'Larg. boss 1', 'Dia. boss 1', 'L furo passagem', 'Dia. furo passagem', 'Espessura tampa', 'L boss 1', 'L boss 2', 'Dia. furo ligação', 'Dia. boss 2', and 'L furo ligação'. It includes two detail views: 'DETAIL B SCALE 4:1' and 'DETAIL D SCALE 4:1'. Below the drawing is a photograph of the physical component, which is a blue metal part with two circular holes.</p> | <p>Dimensões calculadas (mm)</p> | <p>Dimensões escolhidas (mm)</p> |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| <p>Diâmetro do furo de passagem (Dia. furo passagem)</p> | <p>-</p> | <p>6</p> |
| <p>Comprimento do furo de passagem (L furo passagem)</p> | <p>-</p> | <p>17</p> |

Tabela 5.7 Dimensões dos *bosses* e furos da nova tampa (parte 2)

| Características dos <i>bosses</i> para a tampa nova | Dimensões calculadas (mm) | Dimensões escolhidas (mm) |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Diâmetro do furo de ligação (Dia. furo ligação) | 2.08 | 2.1 |
| Comprimento do furo de ligação (L furo ligação) | - | 4 |
| Altura do <i>boss</i> 1 (L boss 1) | - | 17 |
| Diâmetro do <i>boss</i> 1 (Dia. boss 1) | 12 | 12 |
| Comprimento do <i>boss</i> 1 (Comp. boss 1) | - | 12 |
| Largura do <i>boss</i> 1 (Larg. boss 1) | - | 3.4 |
| Altura do <i>boss</i> 2 (L boss 2) | - | 1.5 |
| Diâmetro do <i>boss</i> 2 (Dia. boss 2) | 3.9 | 5 |
| Espessura tampa | - | 2.5 |

Relativamente à disposição dos furos, a ideia é semelhante ao que foi feito para a primeira tampa, apenas era necessário garantir a concentricidade entre os furos da tampa e os da caixa.

Após todos os aspetos dimensionais deste novo protótipo terem sido analisados, realizou-se o *assembly* final. Tal como para o primeiro protótipo, optou-se por mostrar um conjunto digital, representado na Figura 5.52 e o conjunto real, representado na Figura 5.53. No anexo 7 encontra-se o respetivo desenho de catálogo.

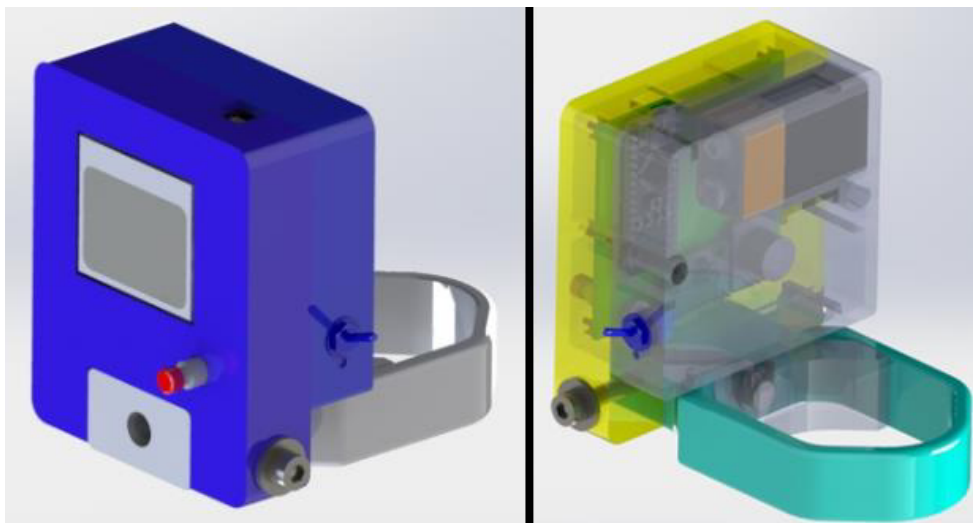


Figura 5.52 Protótipo 2 em formato digital

Para concluir, este protótipo é um melhoramento do anterior pois torna o dispositivo de perpendicularidade totalmente portátil, todavia o tempo de uso que a pilha lhe proporciona não é muito elevado. Com isto, a pilha apenas irá permitir um certo número de medições, quando esse limite for atingido há duas soluções, ou troca-se de pilha ou liga-se através de cabos, tal como no protótipo original.



Figura 5.53 Protótipo 2 em formato real

5.2 Testes

Tendo o protótipo pronto, seguiram-se aos testes. O primeiro começou com uma ação de ligar pela primeira vez o dispositivo, onde se verificou que tudo funcionava corretamente. Por um lado, apresentava valores credíveis de desfasamentos angulares e, por outro, ouvia-se o ruído do *buzzer* sempre que se passava o limite dos cinco graus. Com isto, tornou-se interessante fazer testes reais para verificar se o equipamento era fiável e se os equipamentos usados na produção também o eram.

5.2.1 Validação do dispositivo

Estando em condições de funcionamento, passou-se aos testes de validação, para garantir a fiabilidade do dispositivo. No entanto, havia duas validações a executar, a validação da parte mecânica e a da eletrónica, sendo que a primeira já se validava por si só.

No que respeita à parte mecânica, era necessário garantir que a ligação entre o dispositivo e os equipamentos era a ideal, ou muito próxima disso. Em relação aos equipamentos horizontais, tais como bases e “dispositivos” de aparafusamento e mesas não havia qualquer obstáculo pois a base do dispositivo estava devidamente alinhada. Em relação às máquinas de aparafusar, o processo de medição era um pouco mais complexo, visto que era necessário estabelecer a perpendicularidade entre a “braçadeira” e a máquina. O que se pretendia era que o plano da “braçadeira” estivesse perpendicular ao eixo da máquina de aparafusar garantindo assim que o sistema eletrónico estaria bem posicionado para realizar as medições.

Durante o processo de construção do protótipo, foi usada uma peça já existente e isso não foi feito por acaso. A “braçadeira” é uma peça usada pelos *ergo-arms* para estabelecer a ligação entre o seu braço e a máquina de aparafusar. Esta peça apresenta uma elevada área de contacto e ainda uma forma adequada para encaixar na máquina de aparafusar. Desta forma, falava-se de uma peça que foi desenhada especialmente para estabelecer uma ligação fidedigna e com isso a perpendicularidade com a máquina de aparafusar. Através do aperto, estabelecia-se a união “perfeita”, contudo para garantir que isso tinha mesmo acontecido, usou-se um esquadro para verificar a posição entre a máquina de aparafusar e dispositivo, como se verifica na Figura 5.54.

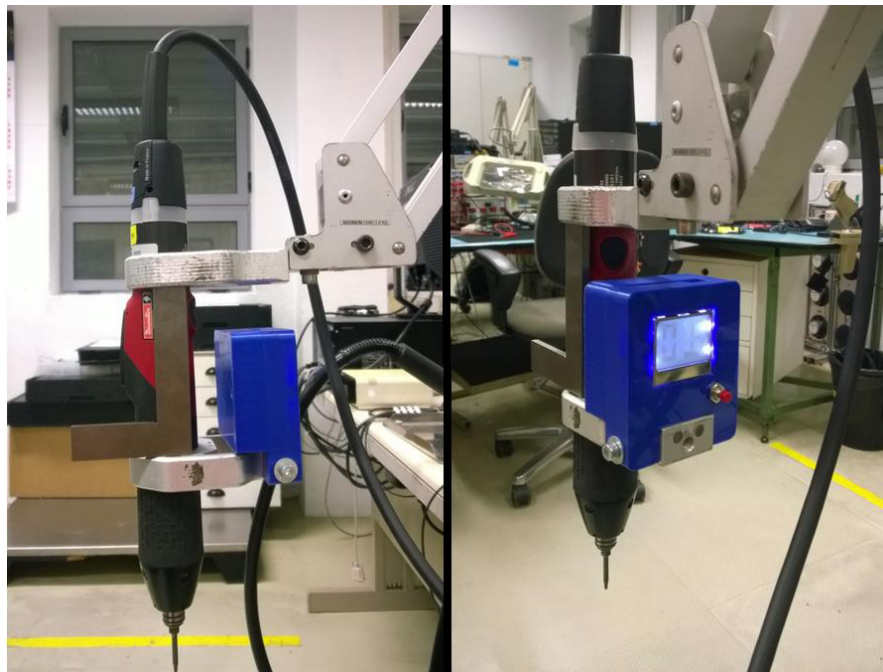


Figura 5.54 Teste da parte mecânica

Para testar a parte eletrónica, pensou-se em dois métodos, A e B. Um consistia em construir uma estrutura com a mesma forma da máquina de aparafusar mas que o seu eixo fizesse 90 graus com a horizontal, o outro consistia em realizar repetidamente várias medições nos equipamentos.

Para o método A, o objetivo de teste centrava-se em colocar inicialmente o dispositivo em cima de uma estrutura horizontal e fazer o *reset*, estabelecendo-se a posição perfeita. Para a validação, acoplava-se o dispositivo na estrutura vertical e registava-se o valor angular medido. Se o sistema não tivesse falhas, o valor registado seria igual a zero, caso contrário o sistema não era perfeito.

Por outro lado, tinha-se o método B, que funcionava de forma diferente com exceção da primeira fase, a fase de calibração, sendo por isso igual à do método A. Para validar o sistema estabelecer-se-iam dois processos. O primeiro consistia em obter sucessivas medições de uma mesa de aparafusamento e registar os valores obtidos, o segundo era exatamente igual mas era executado numa máquina de aparafusar. Assim, se o sistema não apresentasse falhas todos os valores registados para a mesa seriam iguais e todos para a máquina de aparafusar também o seriam, caso contrário o sistema apresentava erros.

Para poder-se decidir qual o método mais aceitável, optou-se por fazer uma comparação entre as vantagens e desvantagens dos dois métodos. Em termos de precisão, ambos os métodos eram iguais pelo que as únicas diferenças eram relativas ao custo e ao processo em si. O método B era mais económico mas mais lento e moroso do que o A. Deste modo, facilmente se optou pelo método B, pois o tempo para realizar os testes não apresentava ser um obstáculo mas o custo associado a desenvolver uma estrutura vertical com a forma da máquina de aparafusar sim.

Tendo escolhido qual o método a utilizar, apenas restava iniciar os testes e apresentar os resultados. Para tal, optou-se por realizar duas tabelas, a Tabela 5.8 relativa às medições na mesa de aparafusamento e a Tabela 5.9 relativa às medições numa máquina de aparafusar, juntamente com as respetivas fotos, a Figura 5.55 e a Figura 5.56.



Figura 5.55 Teste de repetibilidade em mesa de aparafusamento

Tabela 5.8 Resultados de medições em mesa de aparafusamento

| Medições em mesa de aparafusamento | | | | | | |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ordem de testes | Teste nº 1 | Teste nº 2 | Teste nº 3 | Teste nº 4 | Teste nº 5 | Teste nº 6 |
| Medições (Graus) | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.1 |

Como se pode verificar na Tabela 5.8, os resultados são muito semelhantes, variando uma ou duas décimas, o que se admitiu ser bastante normal dado os próprios erros do sistema eletrónico. Assim, tendo em conta apenas os resultados deste teste, admitiu-se que o dispositivo

apresentava elevada precisão, o que foi um fator bastante positivo. Restava fazer o mesmo para uma máquina de aparafusar.



Figura 5.56 Teste de repetibilidade em máquina de aparafusar

Tabela 5.9 Resultados de medições em máquinas de aparafusar

| Medições em máquinas de aparafusar | | | | | | |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ordem de testes | Teste nº 1 | Teste nº 2 | Teste nº 3 | Teste nº 4 | Teste nº 5 | Teste nº 6 |
| Medições (Graus) | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.3 |

Mais uma vez e como se verifica na Tabela 5.9 os resultados foram positivos, apresentando valores credíveis. No entanto, houve algumas alterações relativamente à mesa de aparafusamento.

Isto aconteceu porque havia uma limitação, não era fácil estabelecer, constantemente, a ligação perfeita com a máquina de aparafusar. Apesar da “braçadeira” garantir a perpendicularidade, não havia nenhuma garantia que de cada vez que se retirava e tornava a colocar o dispositivo na máquina de aparafusar a posição obtida era igual. O erro seria mínimo mas essa seria a única explicação para este desfasamento de valores, relativamente aos testes anteriores.

Concluídos os testes, ainda não se tinha descoberto algo bastante interessante, o erro do dispositivo, pelo que esse foi o passo seguinte. Visto que para obter-se dados estatísticos teria de se ter uma amostra com pelo menos 30 medições, optou-se por apenas testar a mesa de aparafusamento, pois era um processo mais simples e bem mais preciso de executar. Após a recolha de dados estar completa, e visto ser uma amostra de certa forma elevada, optou-se por apresentar os resultados em forma de histograma, como se verifica na Figura 5.57.

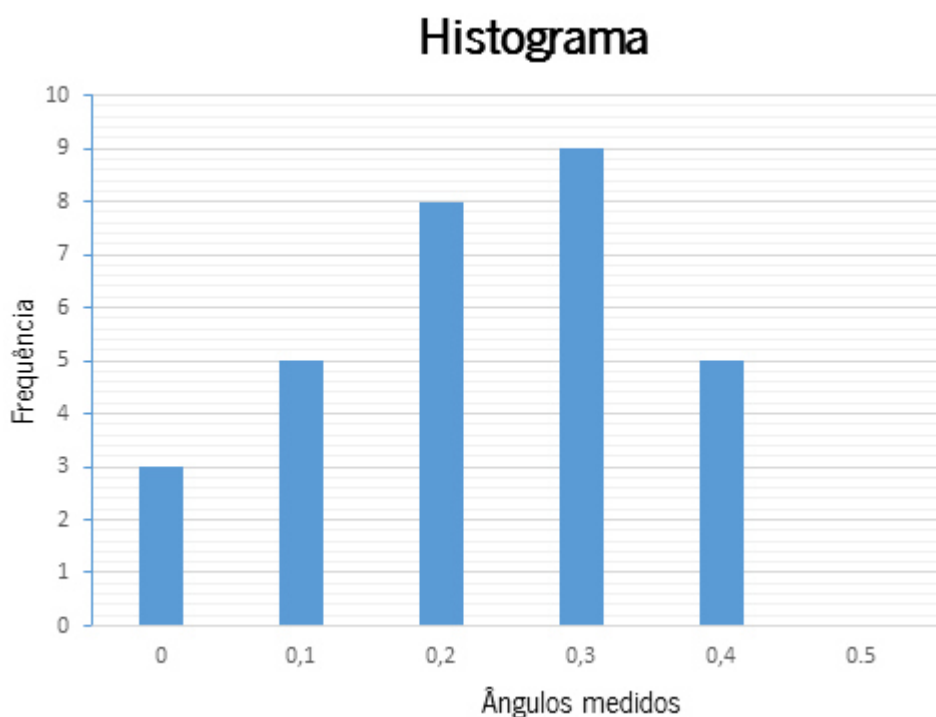


Figura 5.57 Histograma dos resultados obtidos

Como se observa, a maior parte dos resultados obtidos correspondem aos ângulos 0.2 e 0.3, contudo isso não era suficiente para analisar a eficiência do dispositivo. Para tal, recorreu-se à estatística onde se calculou a média e o desvio padrão. A partir destes dois parâmetros, realizou-se uma distribuição normal dos resultados obtidos e com isso foi possível saber que:

- 65% dos resultados encontram-se entre 0.13 e 0.33 graus;
- 99.97% dos resultados encontram-se entre -0.07 e 0.53 graus.

Considerando esta distribuição de valores, obteve-se que 99.97 % dos resultados estariam contidos entre -0.3 e +0.3 graus. Era exatamente isto que se pretendia, saber a margem de erro do dispositivo, assim concluiu-se que o dispositivo apresentava uma tolerância de ± 0.3 graus. Dada à resolução pretendida para as medições, o valor obtido de margem de erro é bastante aceitável. Obteve-se então a validação do dispositivo.

5.2.2 Teste aos equipamentos

O próximo passo seria testar as máquinas de aparafusar, os “dispositivos” e as bases de aparafusamento e verificar a sua fiabilidade, tendo como referência uma mesa, para calibração do sistema. Sendo que este dispositivo era suposto medir em modo *offline*, o principal objetivo deste teste seria verificar a orientação dos equipamentos e saber os que estavam em condições, boas, aceitáveis ou más. Este teste foi de certa forma semelhante ao anterior, pois tal como no anterior, também se obtiveram medições das máquinas de aparafusar mas, desta vez, não interessava validar o dispositivo mas sim os equipamentos.

Assim, começou-se por medir as máquinas de aparafusar, optou-se por medir apenas as 6 máquinas de uma linha de produção, pois seria uma amostra suficiente para se ter uma noção de como a orientação das máquinas apresentava ser.

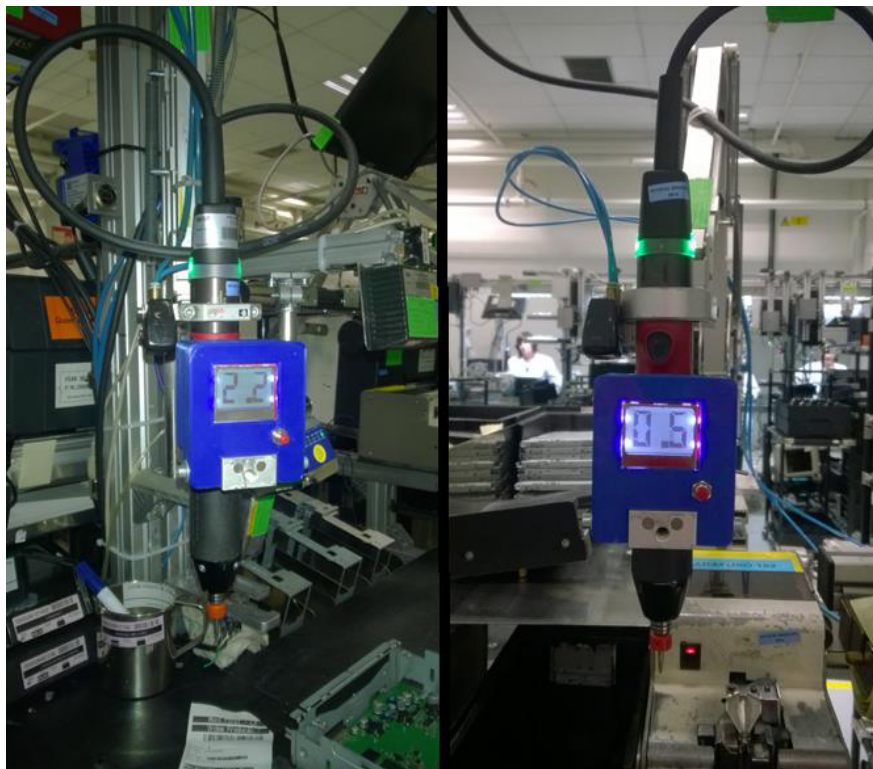


Figura 5.58 Medição nas máquinas de aparafusar

Visto tratar-se de várias máquinas de aparafusar, não fazia sentido apresentar fotos de todas elas, pelo que apenas se mostrou duas, representadas na Figura 5.58, para dar uma ideia mais visual do processo de teste.

Tabela 5.10 Registo dos valores angulares das máquinas de aparafusar em modo *offline*

| Medições em linha de produção | | | | | | |
|-------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| Máquinas de aparafusar | Nº1 | Nº 2 | Nº 3 | Nº 4 | Nº 5 | Nº 6 |
| Medições (Graus) | 2.0 | 0.5 | 3.5 | 2.2 | 5.7 | 7.1 |

Foram assim realizadas sucessivas medições em todos os postos de uma linha, obtendo-se situações boas e outras menos boas. Chegou-se à conclusão que nenhuma máquina apresentava a orientação perfeita relativamente à direção da gravidade. Todavia, como se verifica na Tabela 5.10, uma grande parte das máquinas de aparafusar apresentavam uma direção aceitável para um bom processo de aparafusamento.

O mesmo processo foi feito para as bases e “dispositivos” de aparafusamento, representados nas Figura 5.59 e Figura 5.60 respetivamente, contudo, como se tratava de estruturas horizontais era mais simples manter a posição estável.



Figura 5.59 Medição em base de aparafusamento

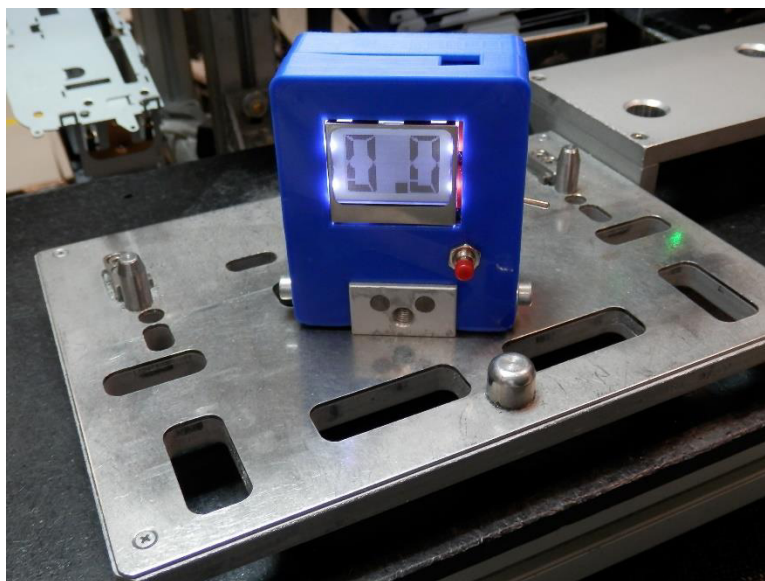


Figura 5.60 Medição em “dispositivo” de aparafusamento

Tabela 5.11 Registo dos valores angulares das bases e “dispositivos” de aparafusamento

| Medições em linha de produção | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Bases | Nº 1 | Nº 2 | Nº 3 | Nº 4 | Nº 5 | Nº 6 |
| Medições (Graus) | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.2 | 0.3 |
| | | | | | | |
| Dispositivos | Nº 1 | Nº 2 | Nº 3 | Nº 4 | Nº 5 | Nº 6 |
| Medições (Graus) | 0.0 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 0.1 |

Tal como para as máquinas de aparafusar também as bases e os “dispositivos” de aparafusamento apresentavam situações boas e outras menos boas, como se verifica na Tabela 5.11. Contudo e talvez por tratarem-se de estruturas horizontais, que se encontram fixas na mesa de aparafusamento, não havia margem para grandes variações, pelo que a maioria apresentava ótimas condições, como se vê nos resultados obtidos. Além disso, estava-se a medir uma estrutura horizontal, bem mais simples de executar e, por isso, menos erros foram introduzidos aquando do processo de medição.

Com este teste, foi possível analisar o estado de todos os equipamentos e saber quais os que precisavam de ser calibrados, o que coincidiu com os postos que davam um maior número de problemas.

Em tom de conclusão, este seria o propósito do dispositivo de perpendicularidade, ou seja, obter medições periódicas dos equipamentos. Desta forma, era possível fazer uma validação a longo prazo, para saber o que estava bom e o que precisava de ser alterado.

5.3 Implementação do dispositivo

Visto este protótipo ter apresentado medições com elevada precisão e ser bastante prático, foi do interesse da empresa usá-lo no processo de aparafusamento. Com isso foi necessário desenvolver um procedimento para a sua implementação, representado na Tabela 5.12, com vista a tornar mais claro o trabalho do operador. No entanto, este foi apenas um procedimento proposto o que não significa que será o procedimento a implementar na empresa num futuro próximo.

Tabela 5.12 Procedimento de aplicação do dispositivo de perpendicularidade

| Procedimento de implementação do dispositivo de perpendicularidade | |
|--|--|
| Passo 1 | Fazer <i>reset</i> ao sistema numa superfície regular |
| Passo 2 | Aparafusar adequadamente o dispositivo na máquina de aparafusar |
| Passo 3 | Usar um esquadro para verificar que a ligação entre “braçadeira” e a máquina de aparafusar perfaz 90 graus |
| Passo 4 | Esperar alguns segundos para que o sistema estabilize |
| Passo 5 | Registar o valor do desfasamento angular obtido |

Sendo que este dispositivo foi concebido para medir e registar valores em modo *offline*, pensou-se em utilizá-lo antes e depois dos turnos de trabalho. Desta forma, eram feitas medições de manhã, na hora do almoço e ao final da tarde.

Assim, era possível ter uma noção da variação angular ao longo do dia e mais do que isso. Colocando todos os dados num documento *Excel*, era possível saber no decorrer de semanas, meses ou anos como o processo de aparafusamento afetava a orientação dos equipamentos.

Capítulo 6 Conclusões

Tal como a afirmação realizada no início desta dissertação, os principais objetivos deste projeto seriam ganhar experiência de trabalho e melhorar a produção da empresa. Pode-se agora confirmar que ambos foram alcançados.

Inicialmente, foi possível ter uma noção de como a fábrica funcionava, onde o processo de fabrico começava, acabava e do que dependia, como era feita a divisão em diferentes setores e como estes funcionavam. Foi também possível perceber como era feita a gest dos trabalhadores para uma maior produção sem que isso tornasse o processo menos saudável, entre outros. Com isto, foi bem menos complexo criar um estado de arte específico, contendo aquilo que garantia um bom processo de aparafusamento.

Por outro lado, foi possível conviver com vários profissionais de diversas áreas de trabalho e ajudar no processo de produção. Ao longo do estágio foram realizadas tarefas como análises, medições e correções de erros de produção e definição de novos procedimentos a ser implementados. Desta forma, foi possível ter uma ideia de como um engenheiro mecânico na área automóvel, nomeadamente dos autorrádios, trabalhava pelo que foi uma experiência bastante enriquecedora e permitiu atingir o primeiro objetivo.

Apesar da participação constante ter ajudado no processo de produção da empresa, só por si não foi suficiente. Para tal era necessário alterar alguma coisa, resolver algum problema, no fundo introduzir algo que facilitasse a produção. Assim, o desenvolvimento de um protótipo que permitisse saber quando uma máquina de aparafusar estava direita ou não contribuiu bastante.

Com o desenvolvimento deste protótipo foi possível melhorar conhecimentos nas áreas da mecânica, eletrónica e informática. No que respeita à mecânica, pela criação de um *design* de um produto novo, pelo seu fabrico e definição das ligações mais apropriadas. Na eletrónica, pois trabalhou-se com componentes sobre os quais não havia grande conhecimento e com eles estabeleceu-se um sistema de medição angular fidedigno. Finalmente, e em relação à informática, consolidou-se os conhecimentos em programação, algo que já tinha sido feito no início do curso mas que estava bastante esquecido.

Além do conhecimento adquirido durante a execução deste protótipo, contribui-se para uma produção de maior qualidade o que foi o aspeto mais reconfortante de todo o estágio. Assim, ficou-

se a saber algo, que até então era desconhecido, quais os equipamentos que estavam em boas e más condições de trabalho e com isto proporcionar que fossem introduzidos melhoramentos na terceira maior causa de autorrádios defeituosos.

6.1 Limitações e desenvolvimentos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste projeto, foi possível obter um dispositivo que transmitisse dados aceitáveis e o fizesse de forma prática, pelo que correspondeu às exigências impostas. Contudo, e apesar das sucessivas alterações, não era um sistema perfeito pelo que ainda havia espaço para melhoramentos.

Em primeira instância, não havia uma garantia máxima que a ligação entre o dispositivo e a máquina de aparafusar era realmente perpendicular. Apesar do giroscópio (contido no *MMU*) ter sido colocado num plano perpendicular ao da “braçadeira” e esta ter a forma da máquina de aparafusar não eram factos suficientes para garantir que todo o conjunto estava paralelo ao eixo da máquina. Para resolver este problema teria de se construir um calibrador, uma peça feita, por exemplo, em acrílico com a mesma forma da máquina de aparafusar. O calibrador estaria sempre em cima da mesa no mesmo eixo da máquina. Assim, sabia-se que quando a máquina fosse inserida dentro do calibrador, estava-se perante a posição perfeita. Deste modo, o dispositivo era acoplado na máquina, de seguida a máquina era encaixada dentro do calibrador e só nesta fase era feito o *reset* ao dispositivo, garantindo-se uma fiabilidade máxima na ligação. Finalmente, quando a máquina voltasse à posição inicial, verificava-se o respetivo desfasamento angular.

Ao longo dos testes de validação das máquinas de aparafusar foi possível identificar uma limitação do dispositivo, o facto de ser muito complexo colocá-lo várias vezes no mesmo sítio. Este foi um fator que condicionou os resultados obtidos e foi um obstáculo difícil de contornar. Para solucionar esta limitação, teria de haver uma nova peça que ficasse sempre ligada na máquina de aparafusar e que permitisse o encaixe com o dispositivo. A ideia principal era que esta peça bloqueasse o dispositivo naquela posição e com isso sabia-se que o dispositivo era sempre colocado no mesmo sítio, o sítio desejado.

Um outro problema era o facto de não ser possível saber qual a direção que a medição indicava. Desta forma, para saber qual a direção correta a estabelecer ter-se-ia como que “brincar” com a máquina de aparafusar, mexendo para um lado e para outro até começar-se a aproximar do zero. Esta era a única maneira de saber quais as direções a alterar para atingir a posição desejável. Para resolver esta limitação, teria de se criar um outro dispositivo que fixasse a máquina de aparafusar e limitasse os seus movimentos. O objetivo seria permitir que um operador movimentasse as máquinas de aparafusar nos três eixos mas fazendo-o individualmente. Só assim

seria possível saber com exatidão para que lado é que a máquina de aparafusar estava torta e posteriormente resolver tal situação.

Durante os testes aos equipamentos surgiu outro problema, o facto da “braçadeira” usada não ser ajustável para todas as máquinas da linha de produção. Como foi anteriormente definido, a “braçadeira” possuía um parafuso que movimentava uma garra para executar o aperto. O problema baseava-se no facto do deslocamento máximo que essa garra efetuava não ser suficiente para apertar determinadas máquinas. Isto acontecia porque estas possuíam um diâmetro muito pequeno comparativamente com a maioria o que impossibilitava obter quaisquer medições. A única forma de solucionar esta limitação era simplesmente usar uma outra “braçadeira”, uma que fosse compatível com a máquina a testar. Sendo que a caixa foi concebida para acoplar-se na “braçadeira”, não deveria haver qualquer problema, tendo apenas de haver atenção para que a base da “braçadeira” fosse a base do dispositivo.

Para concluir, pode dizer-se que apesar de corresponder aos requisitos, este dispositivo apresentava uma limitação estrutural. Tal acontece pois não foram realizados os dimensionamentos necessários durante a sua construção. Isto não significa que apresente uma resistência estrutural deficiente mas talvez seja demasiado resistente para o caso específico. Como referenciado anteriormente, a única tensão que este protótipo vai sofrer é aquela associada ao manuseio do operador e visto ser tão baixa foi desprezada. Assim, se fosse feito um correto dimensionamento poder-se-ia reduzir algumas variáveis, como o número de parafusos, *ribs*, a espessura e o tamanho da peça, entre outros. No entanto, só seria necessário fazer este estudo caso houvesse interesse em produzir este dispositivo em massa com vista a colocá-lo em diversas linhas de produção. Se assim fosse teria de fazer-se um estudo bem mais minucioso a todas as partes deste dispositivo para torná-lo o mais barato e funcional possível.

Com tudo isto era possível elevar a qualidade das medições e tornar este dispositivo adaptável para todas as máquinas de aparafusar da linha de produção. Apesar dos melhoramentos acima indicados melhorarem exponencialmente a fiabilidade deste dispositivo, não significa que isso fosse suficiente para alcançar a perfeição.

Bibliografia

- LandEFeld. (2014). *multi-box countersunk and panhead / round head screws (TORX)*. Retrieved from LandEFeld: <https://www.landefeld.de/gruppe/en/multi-box-countersunk-and-panhead-round-head-screws-torx-/MULTIBOXSPAXHRTX>
- Allbiz. (2013). *KANON TORQUE MEASURING TOOLS*. Retrieved from Allbiz: <http://indore.all.biz/kanon-torque-measuring-tools-g166263#.Vjnmy7fhBD9>
- Alma Bolt Company & Prime Fasteners. (2006). *Machine Screws*. Retrieved from Alma Bolt & Prime Fasteners: <http://almabolt.com/pages/catalog/screws/machine.htm>
- Amazon. (2015). *Machine Screws*. Retrieved from Amazon: <http://www.amazon.com/Stainless-Machine-Finish-Slotted-Threads/dp/B00DD4FCTO>
- Amazon. (2015). *Machine Screws*. Retrieved from Amazon: <http://www.amazon.com/Machine-Plated-Finish-Phillips-Threads/dp/B00DD4BHU2>
- Amazon. (2015). *Sheet Metal Screws*. Retrieved from Amazon: http://www.amazon.com/Steel-Plated-Washer-Thread-Length/dp/B00GICOKTQ/ref=pd_sim_328_1?ie=UTF8&refRID=1X9Z0B3S7DM1S40TN4K4&dpID=51glswv83QL&dpSrc=sims&preST=_AC_UL160_SR154%2C160_
- Anochrome Group. (2015). *Torque Tension Control*. Retrieved from Anochrome Group: <https://www.anochrome.com/wp-content/uploads/2012/04/torque-tension-control.pdf>
- Aquário. (2015). *Pulsador painel N/F OFF/ON 125V 1A*. Retrieved from Aquário: <http://www.aquario.pt/product/pulsador-1p-on-off-preto>
- Arduino. (2015). *What is Arduino?* Retrieved from Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arduino Nano. (2015). *Arduino Nano*. Retrieved from Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- Assembly Mag. (n.d.). *ERS Electric Transducerized Screwdriver*. Retrieved from Assembly Mag: <http://www.assemblymag.com/articles/89739-ers-electric-transducerized-screwdriver>
- Atlas Copco. (2006). *Introduction to Fastening Theory*.
- Atlas Copco. (2007). *Joint Rate & Torque*.
- Autodesk. (2015, Janeiro 20). *FAQ: How is the default safety distance for holes set in NC files?* Retrieved from Autodesk: <https://knowledge.autodesk.com/support/advance-steel/learn->

explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/AdvSteel-FAQ-List/files/GUID-485975AE-E943-4318-90CD-19C3FF8E515D-htm.html

Bollhoff. (2013). *RIPP LOCK®, lock washers, screws and nuts*. Retrieved from Bollhoff: http://www.boellhoff.com/en/de/fasteners/additional_assortments/ripp_lock_screw_lock.php

Bossard Proven Productivity. (2014, Agosto 06). *Self-Tapping Screws: How They Work and How to Use Them*. Retrieved from Bossard Proven Productivity: <http://provenproductivity.com/self-tapping-screws-work-use/>

Brutchen, G. W. (2005). *Threaded fasteners*.

Carmélio, A. V. (2006). *Elementos de Máquinas - Parafusos e Roscas*. Retrieved from Mundo Mecânico: http://www.mundomecanico.com.br/wp-content/uploads/2011/09/01-Parafusos-e-roscas_2.pdf

Chrome Bolt. (2004). *Button Head Torx Drive Chrome Plated Steel Cap Screws*. Retrieved from Chrome Bolt: http://www.chromebolt.com/index.php?option=com_virtuemart&view=category&virtuemart_category_id=195

Delphi. (n.d.). *About Delphi*. Retrieved from Delphi: <http://delphi.pai.pt/>

Delphi E&S. (2005). *Definições/Materiais/Curvas*.

Delphi E&S. (2007). *Threaded Fastener Training*.

Delphi E&S. (2008). *Fastener 101 - Module Two - Fastener Torque Analysis*.

Delphi E&S. (2008). *Fasteners 101 - Module One - Fastener Basics*.

Delphi E&S. (2011). *Threaded Fasteners*.

Desoutter - Industrial Tools. (2009, 02 18). *Posco 500 Positioning System ECS Series Screwdriver, Advanced ergonomics and high-speed performance*. Retrieved from Desoutter - Industrial Tools: [http://m.desouttertools.com/desouttercatalogue/documents/mkg/ECS%20Posco%20\(English\).pdf](http://m.desouttertools.com/desouttercatalogue/documents/mkg/ECS%20Posco%20(English).pdf)

Desoutter - Industrial Tools. (2010, Fevereiro). *CVIC II Controllers - Current control technology*. Retrieved from EUROPNEUAMAQ: <http://www.europneumaq.com/downloads/cvic2en.pdf>

Desoutter - Industrial Tools. (2010). *D57 Balancing Arm by Desoutter - 408903*. Retrieved from Pneumatic Tools Online: <https://pneumatictoolsonline.com/product/d57-balancing-arm-by-desoutter-408903/>

- Desoutter - Industrial Tools. (2013, Julho). *Accessories Optimized workstation - Fastening Accessories - Air Line Network*. Retrieved from Desoutter - Industrial Tools: <http://www.chreed.com/wp-content/uploads/2014/06/Desoutter-Accessories.pdf>
- Desoutter, Industrial Tools. (2012). *ERS - Electric Transducerized Screwdrivers*. Retrieved from Desoutter, Industrial Tools: [http://m.desouttertools.com/desouttercatalogue/documents/mkg/ERS%20-%20Electric%20Transducerized%20Screwdrivers%20\(English\).pdf](http://m.desouttertools.com/desouttercatalogue/documents/mkg/ERS%20-%20Electric%20Transducerized%20Screwdrivers%20(English).pdf)
- Ds-Ergonomics. (2015). *Evoluent 4 Ergonomic Mouse*. Retrieved from Ds-Ergonomics: <http://www.ds-ergonomics.com/mobile-working/ergonomic-mice/bakker-elkhuizen/evoluent4/>
- Ebay. (2015, Outubro 14). *MPU-6050 Module 3 Axis Gyroscope Accelerometer Sensor for Arduino DIY*. Retrieved from Ebay: <http://www.ebay.com/itm/MPU-6050-Module-3-Axis-Gyroscope-Accelerometer-Sensor-for-Arduino-DIY-/251928028217>
- Ebay UK. (2015, Outubro 21). *M1.6 (1.6mm) A2 STAINLESS MACHINE SCREW POZI PAN HEAD POZIDRIVE BOLTS DIN7985*. Retrieved from Ebay UK: <http://www.ebay.co.uk/itm/M1-6-1-6mm-A2-STAINLESS-MACHINE-SCREW-POZI-PAN-HEAD-POZIDRIVE-BOLTS-DIN7985-/360660202307>
- Ebay UK. (03 de Novembro de 2015). *Security Screwdriver Bits*. Obtido de Ebay UK: <http://www.ebay.co.uk/itm/Security-Bit-Set-75mm-long-power-Screwdriver-Bits-Phillips-Pozi-Torx-Star-Hex-/151153696883>
- EJOT. (2008). *EJOT Spiralform*. Retrieved from EJOT: http://www.ejot-avdel.se/sites/default/files/product/files/Brochure_EJOT_Spiralform_06.10_en.pdf
- Engineering Toolbox. (2015). *Mass and Weight*. Retrieved from Engineering Toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com/mass-weight-d_589.html
- Ergo Care. (2015). *3M Adjustable Dual Monitor Arm - MA220MB*. Obtido de Ergo Care: <http://www.ergocare.com.au/products/accessories/3MAdjustableDualMonitorArm.php>
- Ergonomic Evolution. (2015). *Ergonomic Seating*. Retrieved from Ergonomic Evolution: http://www.ergonomicevolution.com/ergonomic_chairs_seating.html
- EUROPNEUMAQ. (2015, Novembro 03). *LOW TORQUE FASTENING SOLUTIONS*. Retrieved from EUROPNEUMAQ: http://www.europneumaq.com/index.php?option=com_content&view=article&id=131:uma-gama-completa-de-aparafusadoras&catid=43:novidades&Itemid=252&lang=en
- Exx.se. (2015). *Bolt Heads*. Retrieved from Exx.se: http://www.exx.se/techinfo/bolt_heads/

- Fabbaloo. (2013, Maio 08). *Shrinkage: A Problem of 3D Measurement*. Retrieved from Fabbaloo: <http://www.fabbaloo.com/blog/2014/5/8/shrinkage-a-problem-of-3d-measurement>
- FastTech. (2013, Janeiro 20). *KEYES Arduino Compatible Active Speaker Buzzer Module*. Retrieved from FastTech: <https://www.fasttech.com/product/1219302-keys-arduino-compatible-active-speaker-buzzer>
- Flexible Assembly. (2015). *Assembly Tools DC controller*. Retrieved from Flexible Assembly: <http://www.flexibleassembly.com/Products/Atlas-Copco-MT-Focus-400-MicroTorque-Tools-Category/8432-0815-82>
- Helman CNC. (2012). *CNC Tools Torx Plus Screws and Torx Plus Screwdriver Resist Cam-out*. Retrieved from Helman CNC: <http://www.helmancnc.com/cnc-tools-torx-plus-screws-and-torx-plus-screwdriver-resist-cam-out/>
- How Stuff Works? (2015). *How do you use self-tapping screws?* Retrieved from How Stuff Works?: <http://home.howstuffworks.com/self-tapping-screws.htm>
- IHS Engineering 360. (2015). *Mechanical Fasteners*. Retrieved from IHS Engineering 360: http://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/mechanical_fasteners/bolts
- In SlideShare. (2014, Janeiro 14). *Produto Escalar*. Retrieved from In SlideShare: <http://pt.slideshare.net/RenataDourado/produto-escalar>
- Indiamart. (2015). *Thread Cutting Screw*. Retrieved from Indiamart: <http://dir.indiamart.com/impcat/thread-cutting-screw.html>
- Machine Design. (2009, Agosto 18). *Understanding the Nut Factor in Threaded-Fastener Torque-Tension Relationship*. Retrieved from Machine Design: <http://machinedesign.com/fasteners/understanding-nut-factor-threaded-fastener-torque-tension-relationship>
- Melfast. (2014, Abril 18). *5 FREQUENTLY USED FASTENER HEAD STYLES AND THEIR APPLICATIONS*. Retrieved from Melfast: <http://www.melfast.com/blog/2014/04/5-frequently-used-fastener-head-styles-and-their-applications/>
- mental_floss. (2013). *Screw This, Screw That: Why We Have Different Types of Screws*. Retrieved from mental_floss: <http://mentalfloss.com/article/26929/screw-screw-why-we-have-different-types-screws>
- Morais, J. M. (2006). *Desenho Técnico Básico 3* (Vol. 3). Porto, Portugal: Porto Editora.
- Mountz. (2015). *Techniques to Reduce Joint Relaxation in Fastened Joints*. Retrieved from Mountz: <http://www.mountztorque.com/learning-center/article/techniques-reduce-joint-relaxation-fastened-joints>

- Mountz. (2015). *Three Proven Methods of Verifying Torque Specifications*. Retrieved from Mountz: <http://www.mountztorque.com/learning-center/guide/three-proven-methods-verifying-torque-specifications>
- Mutual Screw & Supply. (2015, Julho 07). *Different Types of Tacoma Screws*. Retrieved from Mutual Screw & Supply: <http://blog.mutualscrew.com/2015/07/07/different-types-of-tacoma-screws/>
- National Maritime Research Institute. (2003). *Making a Screw Thread*. Retrieved from National Maritime Research Institute: https://www.nmri.go.jp/eng/khirata/metalwork/basic/bolt/index_e.html
- New Metal Worker. (2014). *Repairing Inside and Outside Threads*. Retrieved from New Metal Worker: <http://www.newmetalworker.com/repthrds.html>
- Over Clock. (2010, Maio 16). *EVGA RMA: Screw holes stripped, not repairable - Page 5*. Retrieved from Over Clock: <http://www.overclock.net/t/727838/evga-rma-screw-holes-stripped-not-repairable/40>
- PCE Instruments. (2015). *Torque Meter PCE-TM 80*. Retrieved from PCE Instruments: https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/torque-meter-pce-instruments-torque-meter-pce-tm-80-det_59926.htm?_list=kat&_listpos=1
- Portal Met@alica. (2008). *Parafusos: definição e tipos*. Retrieved from Portal Met@alica - Construção Civil: <http://www.metalica.com.br/artigos-tecnicos/parafusos>
- REMINC. (2005). *Taptite 2000*. Retrieved from REMINC: <http://www.taptite.net/taptite/taptite2.asp>
- Shen Chou Fasteners Industrial. (2015). *Thread Forming Screw-PT Thread*. Retrieved from Shen Chou Fasteners Industrial: <http://www.shenchou.com.tw/s/en/2/product/Thread-Forming-Screw-PT-Thread-422022.html>
- Silverfish Longboarding. (2013, Fevereiro 02). *Do I need to countersink my truck holes?* Retrieved from Silverfish Longboarding: <https://www.silverfishlongboarding.com/forum/longboarding-resources-q-a/309128-do-i-need-countersink-my-truck-holes.html>
- Solid. (2011). *What is Arduino?*. Retrieved from Solid: http://www.soliddepot.com/index.php?main_page=product_info&products_id=165
- Sparkfun. (2015, Junho). *SparkFun Triple Axis Accelerometer and Gyro Breakout - MPU-6050*. Retrieved from Sparkfun: <https://www.sparkfun.com/products/11028>
- Speedytek. (2015). *Nokia 5110 LCD*. Retrieved from Speedytek: <http://www.bdspeedytek.com/product/nokia-5110-lcd/>

- Stanley Engineered Fastening. (2015, Setembro). *Engineered Threaded Fasteners for Plastic*. Retrieved from Stanley Engineered Fastening: http://www.stanleyengineeredfastening.com/sites/www.emhartamericas.com/files/downloads/Threaded_Fasteners_for_Plastics.pdf
- Stratasys Direct Manufacturing. (2015). *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Retrieved from Stratasys Direct Manufacturing: <https://www.stratasysdirect.com/resources/fused-deposition-modeling/>
- Thumper Talk. (2008, Março 16). *help - best way to remove stripped screw?* Retrieved from Thumper Talk: <http://www.thumpertalk.com/topic/534011-help-best-way-to-remove-stripped-screw/>
- Tool Cobber. (2012). *Screwdriver Bits*. Retrieved from Tool Cobber: <http://www.toolcobber.com.au/power-tools/drilling/accessories/screwdriver-bits/>
- Whatls. (2010, Setembro). *NC File Format*. Retrieved from Whatls: <http://whatls.techtarget.com/fileformat/NC-Instructions-for-numerical-control-machine-CAMS>
- Wikipedia. (2015, Novembro 4). *Arduino*. Retrieved from Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- Wikipedia. (2015, Novembro 03). *Inertial measurement unit*. Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit
- Wikipedia. (2015, Novembro 02). *Screw*. Retrieved from Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Screw>
- wiseGEEK. (2015, Outubro 06). *What is a Machine Screw?* Retrieved from Wise Geek: <http://www.wisegeek.com/what-is-a-machine-screw.htm>
- wiseGEEK. (2015, Outubro 19). *What is a Tapping Screw?* Retrieved from wiseGEEK: <http://www.wisegeek.com/what-is-a-tapping-screw.htm>
- Wonkee Donkee Tools. (2015). *What are the parts of a screw?* Retrieved from Wonkee Donkee Tools: <http://www.wonkeedonkeetools.co.uk/screws/what-are-the-parts-of-a-screw/>
- Xsens. (2015). *IMU Inertial Measurement Unit*. Retrieved from Xsens: <https://www.xsens.com/tags/imu/>

Anexos

Anexo 1 - Desenho técnico “braçadeira”

Anexo 2 - Desenho técnico placa PCB

Anexo 3 - Desenho técnico caixa

Anexo 4 - Desenho técnico tampa 1

Anexo 5 - Desenho técnico tampa 2

Anexo 6 - Desenho de catálogo protótipo 1

Anexo 7 - Desenho de catálogo protótipo 2

Anexo 8 - Exemplo de comunicação entre *Arduino* e *IMU*

```
#include
"I2Cdev.h"

#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#include "Wire.h"
#endif

MPU6050 mpu;

#define OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL

#define LED_PIN 13 // (Arduino is 13, Teensy is 11, Teensy++ is 6)
bool blinkState = false;

// MPU control/status vars
bool dmpReady = false; // set true if DMP init was successful
uint8_t mpuIntStatus; // holds actual interrupt status byte from MPU
uint8_t devStatus; // return status after each device operation
(0 = success, != 0 = error)
uint16_t packetSize; // expected DMP packet size (default is 42
bytes)
uint16_t fifoCount; // count of all bytes currently in FIFO
uint8_t fifoBuffer[64]; // FIFO storage buffer

// orientation/motion vars
Quaternion q; // [w, x, y, z] quaternion container
VectorInt16 aa; // [x, y, z] accel sensor
measurements
VectorInt16 aaReal; // [x, y, z] gravity-free accel
sensor measurements
VectorInt16 aaWorld; // [x, y, z] world-frame accel
sensor measurements
```

```

VectorFloat gravity; // [x, y, z] gravity vector
float euler[3]; // [psi, theta, phi] Euler angle container
float ypr[3]; // [yaw, pitch, roll] yaw/pitch/roll
container and gravity vector

// packet structure for InvenSense teapot demo
uint8_t teapotPacket[14] = { '$', 0x02, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0, 0x00,
0x00, '\r', '\n' };

// =====
// === INTERRUPT DETECTION ROUTINE ===
// =====

volatile bool mpuInterrupt = false; // indicates whether MPU
interrupt pin has gone high
void dmpDataReady() {
    mpuInterrupt = true;
}

// =====
// === INITIAL SETUP ===
// =====

void setup() {
    // join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically)
    #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
        Wire.begin();
        TWBR = 24; // 400kHz I2C clock (200kHz if CPU is 8MHz)
    #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
        Fastwire::setup(400, true);
    #endif

    // initialize serial communication
    // (115200 chosen because it is required for Teapot Demo output,
but it's
    // really up to you depending on your project)

```

```

Serial.begin(115200);
while (!Serial); // wait for Leonardo enumeration, others
continue immediately

// initialize device
Serial.println(F("Initializing I2C devices..."));
mpu.initialize();

// verify connection
Serial.println(F("Testing device connections..."));
Serial.println(mpu.testConnection() ? F("MPU6050 connection
successful") : F("MPU6050 connection failed"));

// wait for ready
Serial.println(F("\nSend any character to begin DMP programming
and demo: "));
while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer
while (!Serial.available()); // wait for data
while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer
again

// load and configure the DMP
Serial.println(F("Initializing DMP..."));
devStatus = mpu.dmpInitialize();

// supply your own gyro offsets here, scaled for min sensitivity
mpu.setXGyroOffset(220);
mpu.setYGyroOffset(76);
mpu.setZGyroOffset(-85);
mpu.setZAccelOffset(1788); // 1688 factory default for my test
chip

// make sure it worked (returns 0 if so)
if (devStatus == 0) {
// turn on the DMP, now that it's ready
Serial.println(F("Enabling DMP..."));
mpu.setDMPEnabled(true);

// enable Arduino interrupt detection
Serial.println(F("Enabling interrupt detection (Arduino
external interrupt 0)..."));

```

```

attachInterrupt(0, dmpDataReady, RISING);
mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

// set our DMP Ready flag so the main loop() function knows
it's okay to use it
Serial.println(F("DMP ready! Waiting for first
interrupt..."));
dmpReady = true;

// get expected DMP packet size for later comparison
packetSize = mpu.dmpGetFIFOPageSize();
} else {
// ERROR!
// 1 = initial memory load failed
// 2 = DMP configuration updates failed
// (if it's going to break, usually the code will be 1)
Serial.print(F("DMP Initialization failed (code "));
Serial.print(devStatus);
Serial.println(F(""));
}

// configure LED for output
pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
}

// =====
// ===                MAIN PROGRAM LOOP                ===
// =====

void loop() {
// if programming failed, don't try to do anything
if (!dmpReady) return;

// wait for MPU interrupt or extra packet(s) available
while (!mpuInterrupt && fifoCount < packetSize) {
// other program behavior stuff here
// .
// .
// .

```



```

        // if you are really paranoid you can frequently test in
between other
        // stuff to see if mpuInterrupt is true, and if so, "break;"
from the
        // while() loop to immediately process the MPU data
        // .
        // .
        // .
    }

    // reset interrupt flag and get INT_STATUS byte
    mpuInterrupt = false;
    mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

    // get current FIFO count
    fifoCount = mpu.getFIFOCount();

    // check for overflow (this should never happen unless our code
is too inefficient)
    if ((mpuIntStatus & 0x10) || fifoCount == 1024) {
        // reset so we can continue cleanly
        mpu.resetFIFO();
        Serial.println(F("FIFO overflow!"));

    // otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should
happen frequently)
    } else if (mpuIntStatus & 0x02) {
        // wait for correct available data length, should be a VERY
short wait
        while (fifoCount < packetSize) fifoCount =
mpu.getFIFOCount();

        // read a packet from FIFO
        mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);

        // track FIFO count here in case there is > 1 packet
available
        // (this lets us immediately read more without waiting for an
interrupt)
        fifoCount -= packetSize;

#ifdef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
        // display quaternion values in easy matrix form: w x y z
        mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);

```

```

Serial.print("quat\t");
Serial.print(q.w);
Serial.print("\t");
Serial.print(q.x);
Serial.print("\t");
Serial.print(q.y);
Serial.print("\t");
Serial.println(q.z);
#endif

#ifdef OUTPUT_READABLE_EULER
// display Euler angles in degrees
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetEuler(euler, &q);
Serial.print("euler\t");
Serial.print(euler[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(euler[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(euler[2] * 180/M_PI);
#endif

#ifdef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
// display Euler angles in degrees
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
Serial.print("ypr\t");
Serial.print(ypr[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(ypr[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(ypr[2] * 180/M_PI);
#endif

#ifdef OUTPUT_READABLE_REALACCEL
// display real acceleration, adjusted to remove gravity
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
Serial.print("areal\t");
Serial.print(aaReal.x);
Serial.print("\t");
Serial.print(aaReal.y);
Serial.print("\t");
Serial.println(aaReal.z);

```

```

    #endif

    #ifdef OUTPUT_READABLE_WORLDACCEL
        // display initial world-frame acceleration, adjusted to
remove gravity
        // and rotated based on known orientation from quaternion
        mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
        mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
        mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
        mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
        mpu.dmpGetLinearAccelInWorld(&aaWorld, &aaReal, &q);
        Serial.print("aworld\t");
        Serial.print(aaWorld.x);
        Serial.print("\t");
        Serial.print(aaWorld.y);
        Serial.print("\t");
        Serial.println(aaWorld.z);
    #endif

    #ifdef OUTPUT_TEAPOT
        // display quaternion values in InvenSense Teapot demo
format:
        teapotPacket[2] = fifoBuffer[0];
        teapotPacket[3] = fifoBuffer[1];
        teapotPacket[4] = fifoBuffer[4];
        teapotPacket[5] = fifoBuffer[5];
        teapotPacket[6] = fifoBuffer[8];
        teapotPacket[7] = fifoBuffer[9];
        teapotPacket[8] = fifoBuffer[12];
        teapotPacket[9] = fifoBuffer[13];
        Serial.write(teapotPacket, 14);
        teapotPacket[11]++; // packetCount, loops at 0xFF on
purpose
    #endif

    // blink LED to indicate activity
    blinkState = !blinkState;
    digitalWrite(LED_PIN, blinkState);
}
}

```


Anexo 9 - Código do dispositivo de perpendicularidade

```
#include "I2Cdev.h"

#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"

// Angle Error - Change if necessary

#define angleLimit 5.0f

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#include "Wire.h"
#endif

MPU6050 mpu;

// MPU control/status vars

bool dmpReady = false; // set true if DMP init was successful
uint8_t mpulntStatus; // holds actual interrupt status byte from MPU
uint8_t devStatus; // return status after each device operation (0 = success, !0 = error)
uint16_t packetSize; // expected DMP packet size (default is 42 bytes)
uint16_t fifoCount; // count of all bytes currently in FIFO
uint8_t fifoBuffer[64]; // FIFO storage buffer

// orientation/motion vars
```

```

Quaternion q;      // [w, x, y, z]    quaternion container
VectorInt16 aa;    // [x, y, z]      accel sensor measurements
VectorInt16 aaReal; // [x, y, z]      gravity-free accel sensor measurements
VectorInt16 aaWorld; // [x, y, z]      world-frame accel sensor measurements
VectorFloat gravity; // [x, y, z]      gravity vector
VectorFloat gravityHold;

float euler[3];    // [psi, theta, phi] Euler angle container
float ypr[3];     // [yaw, pitch, roll] yaw/pitch/roll container and gravity vector

// packet structure for InvenSense teapot demo
uint8_t teapotPacket[14] = { '$', 0x02, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0x00, 0x00, '\r', '\n' };

bool readyGravity = false;
unsigned long time;
unsigned long oldtime;
float evalAngle = 0;

#include <LCD5110_Basic.h>
LCD5110 myGLCD(5, 6, 7, 8, 9);

extern uint8_t n0[];
extern uint8_t n1[];
extern uint8_t n2[];
extern uint8_t n3[];
extern uint8_t n4[];
extern uint8_t n5[];
extern uint8_t n6[];
extern uint8_t n7[];
extern uint8_t n8[];

```

```

extern uint8_t n9[];
extern uint8_t ponto[];
extern uint8_t blk[];

char buffer[10];
char oldbuffer[10];

float Angle_Dot_Product(VectorFloat vector1, VectorFloat vector2)
{
    vector1.x = ((int)(vector1.x * 1000.f)) / 1000.f;
    vector1.y = ((int)(vector1.y * 1000.f)) / 1000.f;
    vector1.z = ((int)(vector1.z * 1000.f)) / 1000.f;

    float amp1 = sqrt(vector1.x * vector1.x + vector1.y * vector1.y + vector1.z * vector1.z);

    vector1.x /= amp1;
    vector1.y /= amp1;
    vector1.z /= amp1;

    vector2.x = ((int)(vector2.x * 1000.f)) / 1000.f;
    vector2.y = ((int)(vector2.y * 1000.f)) / 1000.f;
    vector2.z = ((int)(vector2.z * 1000.f)) / 1000.f;

    float amp2 = sqrt(vector2.x * vector2.x + vector2.y * vector2.y + vector2.z * vector2.z);

    vector2.x /= amp2;
    vector2.y /= amp2;
    vector2.z /= amp2;
}

```

```

// Serial.print("areal\t");
// Serial.print(vector1.x, 5);
// Serial.print("\t");
// Serial.print(vector1.y, 5);
// Serial.print("\t");
// Serial.print(vector1.z, 5);
// Serial.print("\t");
// Serial.print("areal\t");
// Serial.print(vector2.x, 5);
// Serial.print("\t");
// Serial.print(vector2.y, 5);
// Serial.print("\t");
// Serial.print(vector2.z, 5);
// Serial.print("\t");

Serial.print("Time: ");
oldtime = time;
time = millis();
//prints time since program started
Serial.println(time - oldtime);

//Serial.print("\t");

return acos(vector1.x * vector2.x + vector1.y * vector2.y + vector1.z * vector2.z) * 180.0f /
M_PI;
}

void setup() {

```



```

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE

  Wire.begin();

  TWBR = 24;

#elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE

  Fastwire::setup(400, true);

#endif

Serial.begin(115200);

while (!Serial); // wait for Leonardo enumeration, others continue immediately

mpu.initialize();

devStatus = mpu.dmpInitialize();

mpu.setXGyroOffset(220);
mpu.setYGyroOffset(76);
mpu.setZGyroOffset(-85);
mpu.setZAccelOffset(1788); // 1688 factory default for my test chip

// make sure it worked (returns 0 if so)
if (devStatus == 0) {
  mpu.setDMPEnabled(true);
  mpuintStatus = mpu.getIntStatus();
  dmpReady = true;
  packetSize = mpu.dmpGetFIFOPageSize();
} else {

}

pinMode(12, OUTPUT); digitalWrite(12, HIGH); // pullup enabled

```

```

    myGLCD.InitLCD();
}

void loop() {

    if (!dmpReady) return;

    // reset interrupt flag and get INT_STATUS byte
    mpuintStatus = mpu.getIntStatus();

    // get current FIFO count
    fifoCount = mpu.getFIFOCount();

    // check for overflow (this should never happen unless our code is too inefficient)
    if ((mpuintStatus & 0x10) || fifoCount == 1024) {
        // reset so we can continue cleanly
        mpu.resetFIFO();
        Serial.println(F("FIFO overflow!"));

        // otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should happen frequently)
    } else if (mpuintStatus & 0x02) {
        // wait for correct available data length, should be a VERY short wait
        while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();

        // read a packet from FIFO
        mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);

        // track FIFO count here in case there is > 1 packet available
        // (this lets us immediately read more without waiting for an interrupt)
    }
}

```

```

fifoCount -= packetSize;

mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);

if (digitalRead(12) == LOW)
{
    mpu.resetFIFO();
    for (int i = 0; i < 3; i++)
    {
        delay(1000);
        mpu.resetFIFO();
    }
    gravityHold = gravity;
    readyGravity = true;
}

evalAngle = Angle_Dot_Product( gravityHold, gravity);
//Serial.println( evalAngle );
}

if (evalAngle <= 10.0)
{
    oldbuffer[0] = buffer[0];
    oldbuffer[1] = buffer[1];
    oldbuffer[2] = buffer[2];
    oldbuffer[3] = buffer[3];
}

```

```

dtostrf(evalAngle, 2, 1, buffer);

if( oldbuffer[0] == buffer[0] && oldbuffer[1] == buffer[1] && oldbuffer[2] == buffer[2])
{
    ;
}
else
{
    for (int k = 0; k < 4; k++)
    {
        if (buffer[k] == '0') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n0, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '1') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n1, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '2') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n2, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '3') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n3, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '4') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n4, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '5') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n5, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '6') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n6, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '7') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n7, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '8') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n8, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '9') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, n9, 27, 48);
        else if (buffer[k] == '.') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 1) * 28, 0, ponto, 27, 48);
    }
}
}
else
{
    oldbuffer[0] = buffer[0];
    oldbuffer[1] = buffer[1];
    oldbuffer[2] = buffer[2];
    oldbuffer[3] = buffer[3];
}

```

```

dtostrf(evalAngle, 2, 0, buffer);

if( oldbuffer[0] == buffer[0] && oldbuffer[1] == buffer[1] && oldbuffer[2] == buffer[2])
{
;
}
else
{
myGLCD.drawBitmap(84 - 28, 0, blk, 27, 48); // clean first digit
for (int k = 0; k < 2; k++)
{
if (buffer[k] == '0') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n0, 27, 48);
else if (buffer[k] == '1') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n1, 27, 48);
else if (buffer[k] == '2') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n2, 27, 48);
else if (buffer[k] == '3') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n3, 27, 48);
else if (buffer[k] == '4') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n4, 27, 48);
else if (buffer[k] == '5') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n5, 27, 48);
else if (buffer[k] == '6') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n6, 27, 48);
else if (buffer[k] == '7') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n7, 27, 48);
else if (buffer[k] == '8') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n8, 27, 48);
else if (buffer[k] == '9') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, n9, 27, 48);
else if (buffer[k] == '.') myGLCD.drawBitmap(84 - (k + 2) * 28, 0, ponto, 27, 48);
}
}
}

if ( readyGravity == true && evalAngle > angleLimit )
tone(3, 400, 1000);
else
noTone(3);

```

}